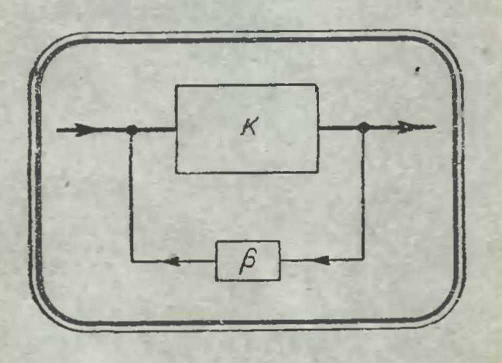


В. Ф. БАРКАН

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В РАДИОПРИЕМНИКАХ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 342

В. Ф. БАРКАН

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В РАДИОПРИЕМНИКАХ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1959 ЛЕНИНГРАД

В книге изложены вопросы использования отрицательной и положительной обратной связи в цепях радиоприемника и рассмотрен ряд схем, применяемых для самых различных целей. Значительное место в книге уделено паразитной обратной связи, способам ее обнаружения и практическим мерам по устранению самовозбуждения радиоприемников.

Книга предназначена для радиолюбителей, знакомых с элементарными основами теории радиоприемных устройств.

Баркан Виталий Федорович

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В РАДИОПРИЕМНИКАХ

Редактор *Ф. И. Тарасов* **Техн. редактор** *П. М. Асанов*

Сдано в пр-во 5/III 1959 г. Подписано к печати 4/VII 1959 г.
Формат бумаги $84 \times 108^1/_{32}$ 3,91 п. л. Уч.-изд. л. 4,8
Т-07844. Тираж 75 000 экз. Цена 1 р. 95 к. Зак. № 275

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в Производственно-издательском комбинате ВИНИТИ
Люберцы Октябрьский проспект, 403 Зак. 3329

СОДЕРЖАНИЕ

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1. ВИДЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В РАДИОПРИЕМНИКЕ

Для улучшения качества воспроизведения радиопрограмм широкое применение в радиоприемной и усилительной аппаратуре имеет отрицательная обратная связь. Наряду с ней в радиоаппаратуре используют и положительную обратную связь. Последняя позволяет улучшить чувствительность и избирательность радиоприемника. Обратной связью называется связь между выходом и входом усилительной системы (рис. 1). При ее наличии часть энергии усиленных колебаний с выхода системы передается на ее вход. Обратная связь называется положительной, если входное и обратное напряжения находятся в фазе, и обратная связь называется отрицательной, когда эти напряжения находятся в противофазе. При положительной обратной связи результирующее напряжение на входе возрастает. При отрицательной обратной связи результирующее напряжение на входе уменьшается. Если обратная связь между выходом и входом усилителя возникает самопроизвольно, ее называют паразитной. Действие последней обычно так или иначе ухудшает работу усилительного устройства, а в ряде случаев, когда эта связь положительная, усилитель самовозбуждается, т. е. превращается в генератор.

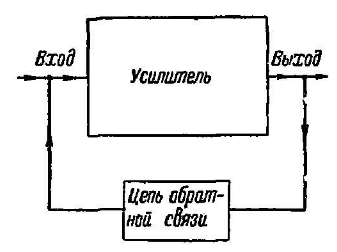


Рис. 1. Скелетная схема усилителя с обратной снязью.

2. УСИЛЕНИЕ СИСТЕМ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Обратной связью могут быть охвачены усилитель высокой или промежуточной частоты, детекторный каскад и усилитель низкой частоты приемника. Суждение об усилительных способностях той или иной системы с обратной связью вне зависимости от ее знака может быть получено из рассмотрения схемы на рис. 2. Здесь усилитель с коэффициентом усиления $K = \frac{U_{вых}}{U_с}$ охвачен обратной связью, которая осуществляется с помощью специальной цепи, обозначенной β. Отношение напряжения $U_β$, поступающего через цепь обратной связи на вход системы, к напряжению на выходе $U_{вых}$ называется **коэффициентом передачи** цепи обратной связи и обозначается β, т. е.

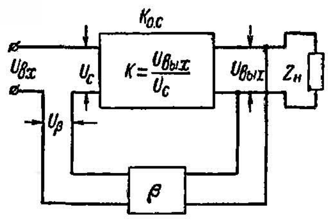


Рис. 2. К выводу величины усиления системы с обратной связью.

$$β = \frac{U_β}{U_{вых}}. \quad (1)$$

$U_β$ называется **напряжением** обратной связи.

Коэффициент β может принимать значения от 0 до +1 при положительной и от 0 до —1 при отрицательной обратной связи. По мере увеличения численного значения обратная связь усиливается, становится более глубокой. Таким образом, напряжение обратной связи в общем случае представляется выражением:

$$U_β = \pm βU_{вых}. \quad (2)$$

Коэффициент усиления усилителя, охваченного цепью обратной связи, можно определить отношением выходного напряжения на нагрузке $U_{вых}$ к напряжению внешнего источника:

$$K_{о.с} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}. \quad (3)$$

Напряжение на входе усилителя слагается из напряжения внешнего источника и напряжения обратной связи:

$$U_с = U_{вх} + U_β$$

Принимая во внимание выражение (2) для U_β, получаем:

$$U_c = U_{вх} + (\pm \beta U_{вых}), \tag{4}$$

откуда

$$U_{вх} = U_c - (\pm \beta U_{вых}). \tag{5}$$

Подставляя значение $U_{вх}$ в формулу (3), получим:

$$K_{о.с} = \frac{U_{вых}}{U_c - (\pm \beta U_{вых})}.$$

Разделим числитель и знаменатель на U_c. Тогда

$$K_{о.с} = \frac{\frac{U_{вых}}{U_c}}{1 - \left(\pm \beta \frac{U_{вых}}{U_c}\right)}.$$

В окончательном виде выражение для коэффициента усиления системы с обратной связью принимает вид:

$$K_{о.с} = \frac{K}{1 - (\pm \beta K)}. \tag{6}$$

Произведение $\pm\beta K$ называется **фактором** обратной связи; знак при факторе обратной связи совпадает со знаком самой обратной связи. При положительной обратной связи знаменатель дроби уменьшается, а коэффициент усиления системы возрастает в $1-\beta K$ раз. При отрицательной обратной связи знаменатель возрастает и коэффициент усиления $K_{о.с}$ падает в $1+\beta K$ раз. Однако проигрыш в усилении, который имеет место при отрицательной обратной связи, компенсируется значительным качественным выигрышем: при использовании такой связи можно добиться резкого уменьшения всех видов искажений, повысить стабильность усиления и обеспечить устойчивость усиления в отношении возникновения паразитной генерации.

Положительная обратная связь на много лет опередила использование отрицательной обратной связи — она начала применяться еще со времен первой мировой войны.

Регенеративная схема давала возможность значительно повысить избирательность и чувствительность приемников, в которых в то время использовались триоды, а колеба-

тельные контуры обладали относительно низкой добротностью. На протяжении более 20 лет регенеративная схема находила широкое применение в большинстве радиовещательных приемников. Она не устарела и до настоящего времени и дает значительный эффект в малоламповых радиолюбительских приемниках.

Метод сверхрегенеративного приема, основанный также на использовании положительной обратной связи, предложен в 1922 г. Он обеспечивает еще более высокую чувствительность малоламповых приемников и до сегодняшнего дня широко используется в диапазоне УКВ.

Отрицательная обратная связь стала внедряться в период, когда встал вопрос о высококачественном воспроизведении радиопрограмм. Широкому ее использованию содействовало развитие электронных ламп.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

3. СПОСОБЫ ПОДАЧИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Обратная связь между выходом и входом усилителя может быть осуществлена различными способами. На рис. 3,*а* цепь обратной связи подключена параллельно нагрузке $Z_н$ и напряжение обратной связи $U_β$ пропорцио-

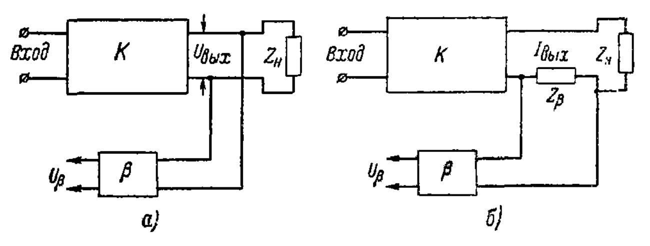


Рис. 3. Два способа подачи обратной связи.
а—обратная связь по напряжению; *б*—обратная связь по току.

нально выходному напряжению усилителя. Такая связь называется обратной связью по напряжению.

Напряжение обратной связи можно снимать с дополнительного сопротивления $Z_β$, включенного последовательно с нагрузкой усилителя (рис. 3,*б*). В этом случае связь называется обратной связью по току, так как величина напряжения обратной связи зависит от тока

в цепи нагрузки. Полученное напряжение обратной связи по первому или второму способу может подводиться на вход усилителя либо последовательно, либо параллельно. На схеме рис. 2 напряжение обратной связи U_β и входное напряжение $U_{вх}$ соединены последовательно, и такая схема называется последовательной обратной связью по напряжению.

Чтобы понять работу схем усилителей низкой частоты с отрицательной обратной связью, нужно отчетливо представлять роль лампы в усилительной схеме. Ее анодную цепь можно представить как сопротивление, величина которого изменяется от действия переменного напряжения на сетке. В положительные полупериоды сопротивление лампы уменьшается, а в отрицательные возрастает. В результате этого анодный ток лампы приобретает пульсирующий характер, а вместе с ним становится пульсирующим и напряжение на аноде. Действие положительной полуволны переменного напряжения на сетке лампы сопровождается увеличением ее анодного тока и напряжения на ее нагрузке. Увеличение напряжения на нагрузке при постоянном напряжении источника анодной цепи вызывает уменьшение напряжения на аноде, и наоборот, отрицательная полуволна переменного напряжения на сетке вызывает увеличение напряжения на аноде. Таким образом, каждой полуволне напряжения на сетке соответствует противоположная по знаку полуволна напряжения на аноде, а это означает, что между переменными напряжениями на аноде и сетке существует сдвиг по фазе, равный 180°.

Все это нужно твердо помнить при рассмотрении схем усилителей с отрицательной обратной связью. На рис. 4 показаны схемы выходного каскада усилителя с последовательной обратной связью по напряжению. Цепь обратной связи состоит из делителя напряжения, в который входит разделительный конденсатор C, и сопротивления R_1, R_2. Делитель подключен параллельно выходной цепи, и поэтому напряжение на цепочке и на лампе равны. Для того чтобы напряжение обратной связи U_β совпадало по фазе с напряжением анодной цепи, должно выполняться условие:

$$R_1 + R_2 \gg \frac{1}{\Omega C}$$

Напряжение обратной связи, снимаемое с сопротивления R_2, имеет фазу, противоположную напряжению на сетке, и подводится к ней через сопротивление утечки R_c последовательно с входным напряжением:

$$\beta = \frac{U_\beta}{U_{вых}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (7)$$

Величиной β задаются в пределах 0,05 — 0,2. Сопротивление делителя выбирают так, чтобы потребляемая им мощность была незначительна. При использовании ламп 6П14П, 6П18П и им подобных $R_1 + R_2 \approx 100$ *ком*. Емкостное сопротивление конденсатора C на низшей частоте не должно превышать $0{,}1\,(R_1 + R_2)$, что выполняется, если $C \geqslant 0{,}1$ *мкф*:

$$R_2 = \beta\,(R_1 + R_2) \text{ и } R_1 = (1 - \beta)(R_1 + R_2).$$

Другой, более употребительный вариант схемы последовательной обратной связи по напряжению показан на рис. 4,*б*.

Здесь напряжение обратной связи снимается с добавочной обмотки выходного трансформатора и подается по-

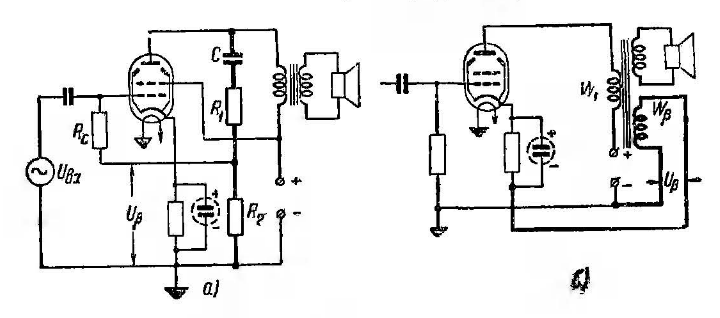


Рис. 4. Схемы выходного каскада с обратной связью по напряжению.

следовательно на вход каскада. В схеме параллельной обратной связи по напряжению (рис. 5,*а*) напряжение обратной связи U_β и входное напряжение $U_{вх}$ соединены параллельно. Этот способ осуществления обратной связи применен в схеме двухкаскадного усилителя, показанной на рис. 5,*б*. Его второй каскад может быть как усилителем мощности, так и усилителем напряжения. Напряжение

обратной связи подается параллельно входу второго каскада через сопротивление R_β.

Когда на сетке лампы $Л_1$ действует напряжение отрицательной полуволны, переменное напряжение на ее аноде сдвигается по фазе относительно сеточного напряжения на 180° и характеризуется положительной полуволной. По тем же причинам полуволна напряжения на аноде $Л_2$ становится отрицательной. Рассматривая в этом случае лампу как источник переменной составляющей анодного тока, можно в зависимости от знака полуволны переменного напряжения на ее аноде показать направление тока лампы. На схеме (рис. 5,*б*) стрелками показаны направле-

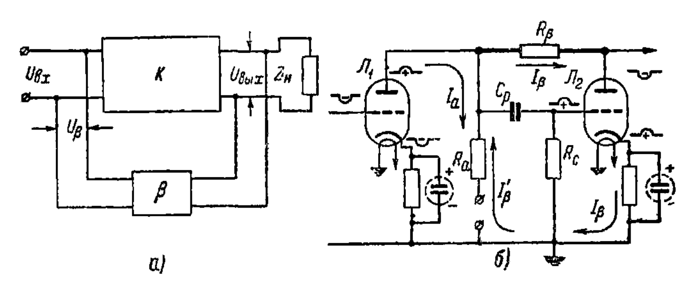


Рис. 5. *Усилитель с параллельной обратной связью по напряжению.*
а—скелетная схема; *б*—практическая схема.

ния анодного тока первой лампы $I_а$ и тока обратной связи I_β. Через сопротивление нагрузки $R_а$ ток $I_а$ и часть тока обратной связи I'_β протекает в противоположных направлениях; следовательно, действие обратной связи уменьшает результирующий ток в нагрузке и вместе с ним переменное напряжение, подводимое к сетке лампы $Л_2$

В схеме последовательной обратной связи по току (рис. 6,*а*) напряжение обратной связи U_β снимается с сопротивления Z_β, включенного последовательно с нагрузкой, и подается на вход последовательно. Примером такого способа подачи обратной связи является схема любого усилительного каскада, в котором сопротивление в цепи катода не заблокировано конденсатором (рис. 6,*б*). Напряжение обратной связи в такой схеме зависит от общего тока анодной цепи и подается на сетку лампы последовательно с входным напряжением. О том, что обратная связь

в схеме (рис. 6,*б*) действительно является отрицательной, легко убедиться, если рассмотреть действие на вход, например, положительной полуволны напряжения. Переменное напряжение на аноде в этом случае характеризуется отрицательной полуволной, а переменная составляющая анодного тока во внешней цепи направлена от катода

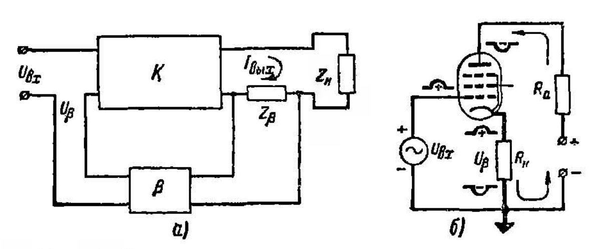


Рис. 6. Усилитель с обратной связью по току.
а—скелетная схема; *б*—практическая схема

к аноду. В результате на сопротивлении $R_к$ образуется напряжение обратной связи U_β, противоположное по знаку входному напряжению.

Глубина обратной связи в таких схемах зависит от отношения сопротивлений в цепи анода и катода, т. е.:

$$\beta = \frac{R_к}{R_а + R_к}. \quad (8)$$

Заметим, что обратная связь по току может возникнуть и тогда, когда сопротивление $R_к$ заблокировано конденсатором недостаточной емкости. При этом некоторая часть переменной составляющей анодного тока проходит по сопротивлению и создает на нем напряжение обратной связи. Обратная связь в этом случае приобретает паразитный характер.

4. ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА НЕЛИНЕЙНЫЕ ИСКАЖЕНИЯ

Нелинейные искажения заключаются в том, что форма колебаний звуковой частоты на выходе усилителя отличается от формы колебаний, поданных на его вход. Такие искажения возникают в усилителях низкой частоты вследствие нелинейности вольтамперных характеристик электронных ламп и цепей с железом. На рис. 7 показано, что

чисто синусоидальное колебание, поданное на вход лампы, из-за нелинейности ее характеристики приобрело на выходе лампы форму, отличную от синусоиды, т. е. исказилось. При этом на выходе усилителя появляются гармоники — звуковые колебания с частотами, кратными воздействующему на вход основному колебанию. Воздействуя на динамический громкоговоритель наравне с колебанием основной частоты, они и искажают звук. На рис. 7 (справа сни-

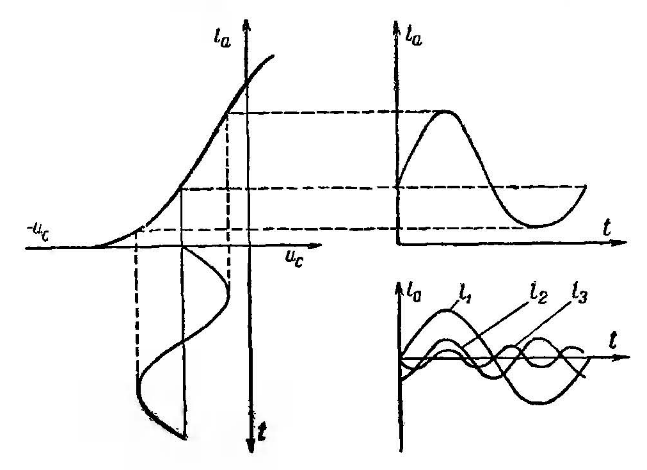


Рис. 7. К вопросу о нелинейных искажениях.

зу) показано графическое разложение несинусоидального колебания на первые три гармоники. Частота первой гармоники равна частоте основного колебания, а частоты второй и третьей гармоник соответственно в 2 и 3 раза больше частоты первой гармоники.

Нелинейные искажения оценивают количественно коэффициентом гармоник:

$$\gamma = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \ldots + I_n^2}}{I_1}, \tag{9}$$

где I_1, I_2, I_3, .., I_n соответственно амплитуды основной частоты второй, третьей и n-й гармоник.

Использование в усилителях низкой частоты отрицательной обратной связи снижает нелинейные искажения. Гармоники с выхода усилителя, будучи поданными по цепи обратной связи на вход усилителя и усиленные по-

следним, приходят на его выход в противофазе, создавая тем самым частичную компенсацию искажений. Коэффициент гармоник при наличии обратной связи

$$\gamma_\beta = \frac{\gamma}{1+\beta K}. \qquad (10)$$

где γ_β — коэффициент гармоник усилителя с обратной связью;

γ — его значение при отсутствии обратной связи.

5. ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ЧАСТОТНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ УСИЛИТЕЛЯ

О равномерности усиления сигналов различных частот, а также о полосе пропускания усилителя можно судить по его частотной характеристике. Идеальной формой частотной характеристики является горизонтальная прямая, при этом сигналы в широком спектре частот усиливаются одинаково. В реальных усилителях наблюдаются отклонения характеристики от прямой линии. Так, например, при спаде частотной характеристики в области нижних частот слабее слышны колебания нижних частот, называемые басами.

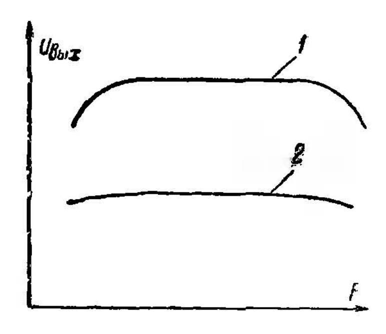


Рис. 8. Частотные характеристики.
1 — без обратной связи; 2 — с обратной связью.

Наиболее часто встречающаяся на практике форма частотной характеристики показана кривой *1* на рис. 8. Как видно из этого графика, выходное напряжение остается неизменным в области средних частот и значительно уменьшается в областях нижних и верхних частот звукового диапазона. Входное напряжение при этом предполагается неизменным.

Выясним, как влияет отрицательная обратная связь на форму частотной характеристики. Если β не зависит от частоты, то при имеющейся частотной характеристике действие обратной связи на различных частотах будет неодинаково. В средней области частот, где выходное напря-

жение является наибольшим, величина напряжения обратной связи $U_\beta = \beta U_{вых}$ будет максимальной. Это приведет к значительному спаду усиления и результирующего выходного напряжения. В областях верхних и нижних частот действие обратной связи сказывается слабее вследствие меньшего значения выходного напряжения и соответственно меньшей величины U_β. Итак, влияние обратной связи на средних частотах оказывается более сильным, чем на крайних частотах, и поэтому частотная характеристика усилителя с обратной связью становится более прямолинейной (кривая *2*).

В том случае, когда частотная характеристика усилителя имеет подъем усиления в одной из областей частот, действие обратной связи имеет обратный характер, но также вызывает спрямление характеристики.

Форма частотной характеристики усилителя зависит от глубины обратной связи и от числа каскадов, охваченных обратной связью. Увеличение глубины обратной связи приближает форму характеристики к идеальной. Однако при большом числе каскадов и достаточно глубокой обратной связи может произойти подъем усиления на крайних частотах диапазона даже в том случае, если характеристика до введения обратной связи имела спад усиления на этих частотах. Изучение этого явления показывает, что в многокаскадных усилителях на этих частотах обратная связь вместо отрицательной зачастую становится положительной и тем самым вызывает не спад усиления, а его подъем. Это может вызвать самовозбуждение усилителя.

6. ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ВХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ УСИЛИТЕЛЯ

Входным сопротивлением усилителя называют сопротивление, которое оказывает каскад переменному току со стороны входных зажимов.

Входное сопротивление каскада шунтирует нагрузку предыдущего каскада и тем самым уменьшает его усиление.

Входное сопротивление усилительного каскада определяется свойствами промежутка сетка — катод лампы и на низких частотах имеет емкостный характер. Поэтому с повышением частоты входное сопротивление каскада уменьшается и его шунтирующее действие проявляется сильнее. Это вызывает спад усиления на верхних частотах.

Действие отрицательной обратной связи на величину входного сопротивления зависит от способа подачи напряжения обратной связи на вход усилителя. Определим входное сопротивление для схемы с последовательной обратной

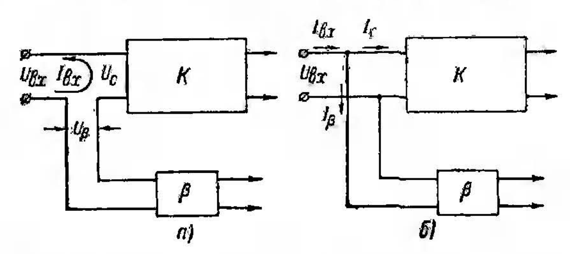


Рис. 9. К вопросу о входном сопротивлении усилителя.

связью (рис 9,*а*). Обозначим входное сопротивление с учетом цепи обратной связи $Z_{вх}=U_{вх}/I_{вх}$ и без учета обратной связи $Z_с=U_с/I_{вх}$. При отрицательном знаке обратной связи

$$U_с=U_{вх}-U_\beta,$$

откуда

$$U_{вх}=U_с+U_\beta.$$

Разделим все члены на $I_{вх}$, тогда

$$\frac{U_{вх}}{I_{вх}}=\frac{U_с}{I_{вх}}+\frac{U_\beta}{I_{вх}}.$$

Используем принятые обозиачения и назовем $U_\beta/I_{вх}=Z_\beta$, после чего получим:

$$Z_{вх}=Z_с+Z_\beta.$$

Таким образом произошло увеличение входного сопротивления, а следовательно, влияние его на предыдущий каскад уменьшилось. С физической точки зрения увеличение входного сопротивления объясняется уменьшением входного тока лампы вследствие того, что из напряжения сигнала вычитается напряжение обратной связи.

При параллельной отрицательной обратной связи, как это следует из рис. 9,*б*, результирующий входной ток $I_{вх}=$

$=I_c+I_\beta$ возрастает. Увеличение тока при неизменном значении $U_{вх}$ означает уменьшение входного сопротивления каскада. С этой точки зрения применение параллельной обратной связи является менее желательным, чем применение последовательной обратной связи.

7. ВЛИЯНИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ НА ВЫХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ УСИЛИТЕЛЯ

Для выяснения понятия о выходном сопротивлении усилителя воспользуемся формулой коэффициента усиления каскада без обратной связи:

$$K=\frac{\mu Z_a}{Z_a+R_i}. \quad (11)$$

Здесь сопротивление Z_a характеризует анодную нагрузку любого вида. Используя известное соотношение из теории электронных ламп

$$\mu=R_iS,$$

получим:

$$K=S\frac{R_iZ_a}{Z_a+R_i}=SZ_э. \quad (12)$$

Величина $Z_э$ представляет собой параллельное соединение сопротивления нагрузки и лампы и называется выходным сопротивлением усилителя. Это сопротивление является величиной частотнозависимой и поэтому может оказывать значительное влияние на постоянство выходного напряжения и, следовательно, на форму частотной характеристики.

Применение ламп с небольшим внутренним сопротивлением R_i уменьшает $Z_э$ и делает его менее зависимым от сопротивления нагрузки Z_a. Влияние отрицательной обратной связи на выходное сопротивление зависит только от способа получения напряжения обратной связи и не зависит от способа ее подачи на вход. Определим величину выходного сопротивления усилителя при отрицательной обратной связи по напряжению. Подставив в выражение (6) значение K из формулы (11), получим:

$$K_{о.с}=\frac{\mu\dfrac{Z_a}{R_i+Z_a}}{1+\beta\dfrac{\mu R_i}{R_i+Z_a}}=\frac{\mu Z_a}{Z_a+R_i(1+\beta\mu)}.$$

Выносим $1+\beta\mu$ за скобки. Тогда

$$K_{o.c}=\frac{\mu}{1+\beta\mu}\cdot\frac{Z_a}{\frac{R_i}{1+\beta\mu}+Z_a}.$$

Введем обозначения: $\mu_э=\frac{\mu}{1+\beta\mu}$ — эквивалентный коэффициент усиления лампы; $R_{iэ}=\frac{R_i}{1+\beta\mu}$ — эквивалентное внутреннее сопротивление лампы. Тогда

$$K_{o.c}=\frac{\mu_э Z_a}{R_{iэ}+Z_a}.$$

Для новых параметров лампы остается справедливым соотношение $\mu_э=R_{iэ}S$. Используя его, получим:

$$K_{o.c}=S\frac{R_{iэ}Z_a}{R_{iэ}+Z_a}=SZ'_э. \tag{13}$$

$Z'_э=\frac{R_{iэ}Z_a}{R_{iэ}+Z_a}$ — это выходное сопротивление каскада с учетом обратной связи. Отсюда следует, что в результате действия отрицательной обратной связи по напряжению параметры лампы R_i и μ уменьшаются в $1+\beta\mu$ раз. Такое уменьшение параметров пентода означает, что он по своим свойствам приближается к триоду. Уменьшение внутреннего сопротивления лампы приводит к уменьшению выходного сопротивления усилителя $Z'_э$, а это благоприятно отражается на работе усилительного каскада.

Математическое определение величины выходного сопротивления при отрицательной обратной связи по току представляет некоторые трудности. Поэтому ограничимся указанием, что в этом случае внутреннее эквивалентное сопротивление лампы $R_{iэ}$ возрастает, а следовательно, увеличивается также и эквивалентное выходное сопротивление усилительного каскада.

Большое выходное сопротивление усилителя не способствует снижению искажений и может даже привести к их увеличению. С этой точки зрения применение обратной связи по напряжению является более целесообразным.

8. РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

В задачу расчета входит обеспечение такого режима работы усилителя, при котором выходная мощность, отдаваемая лампой оконечного каскада после введения обратной связи, сохраняется такой же, как и без обратной связи.

Исходными данными для расчета являются:

1. Наибольшая выходная мощность, отдаваемая лампой $P_{\text{вых}}$ (эта величина обычно задается в справочниках по лампам).

2. Допустимое значение коэффициента гармоник γ_β.

Рекомендуемый порядок расчета:

1. Выбирается тип лампы по величине $P_{\text{вых}}$ и выписываются ее основные параметры при типовом режиме: R_i, μ, коэффициент гармоник γ.

2. Находят напряжение возбуждения на сетке без учета обратной связи (если оно не задано):

$$U_{\text{с}} = \frac{1+\alpha}{\mu}\sqrt{\frac{2P_{\text{вых}}R_i}{\alpha}},$$

где $\alpha = \frac{R_{\text{а}}}{R_i}$ — коэффициент нагрузки (для пентодов и лучевых тетродов $\alpha \approx 0,1$), а $R_{\text{а}}$ — приведенное сопротивление анодной нагрузки, величина которого обычно задается в справочнике.

3. Вычисляют коэффициент усиления без обратной связи:

$$K = \frac{U_1}{U_{\text{с}}} = \frac{\sqrt{2R_{\text{а}}P_{\text{вых}}}}{U_{\text{с}}},$$

где $R_{\text{а}} \approx \alpha R_i$.

4. Находят напряжение на первичной обмотке выходного трансформатора, соответствующее заданной выходной мощности:

$$U_1 = KU_{\text{с}}.$$

5. Определяют фактор обратной связи βK из условия получения заданного коэффициента гармоник γ_β:

$$\gamma_\beta = \frac{\gamma}{1+\beta K}, \text{ откуда } \beta K = \frac{\gamma - \gamma_\beta}{\gamma_\beta}.$$

6. Находят коэффициент передачи обратной связи:

$$\beta = \frac{\beta K}{K}$$

7. Вычисляют коэффициент усиления каскада при наличии обратной связи:

$$K_{о.с} = \frac{K}{1 + \beta K}.$$

Определяют напряжение на входе, необходимое для получения заданного значения $P_{вых}$ при действии обратной связи:

$$U_{вх} = \frac{U_1}{K_{о.с}}.$$

Полученное значение входного напряжения, подводимого к усилителю мощности, позволяет решить вопрос об усилении и числе каскадов усилителя напряжения.

9. Находят значение эквивалентного внутреннего сопротивления лампы, необходимого при определении параметров выходного трансформатора:

$$R_{iэ} = \frac{R_i}{1 + \beta\mu}.$$

10. Рассчитываются элементы цепи обратной связи. Для схемы рис. 4,*а* используются формулы, приведенные в § 3; для схемы рис. 4,*б* и подобных ей находят число витков катушки обратной связи:

$$w_\beta = \beta w_1.$$

Число витков первичной обмотки выходного трансформатора при этом должно быть известно.

Пример расчета. Усилитель должен обеспечить выходную мощность $P_{вых} = 3$ *вт* и допускает нелинейные искажения $\gamma_\beta = 2\%$.

1. Выбираем выходную лампу 6П18П. Ее данные в типовом режиме (см. приложение на стр. 87):

$R_i = 23$ *ком*; $\mu = 250$; $\gamma = 8\%$

2. $U_c = \frac{1 + \alpha}{\mu}\sqrt{\frac{2P_{вых}R_i}{\alpha}} = \frac{1 + 0{,}1}{250}\sqrt{\frac{2 \cdot 3 \cdot 23\,000}{0{,}1}} \approx 5$ *в*.

3. $K = \frac{\sqrt{2R_a P_{вых}}}{U_c} = \frac{\sqrt{2 \cdot 2\,300 \cdot 3}}{5} = 24.$

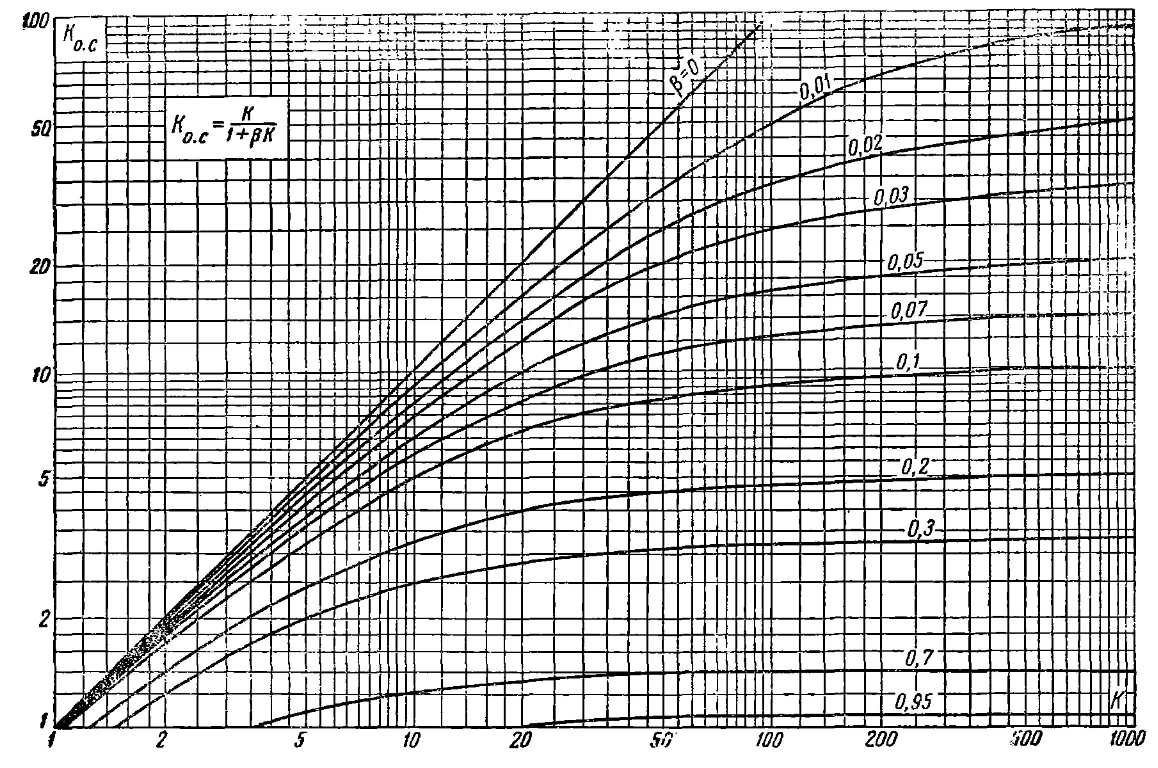


Рис. 10. График для расчета усиления при обратной связи.

4. $U_1 = KU_c = 5 \cdot 24 = 120$ *в*.

5. $\beta K = \frac{\gamma - \gamma_\beta}{\gamma_\beta} = \frac{8-2}{2} = 3.$

6. $\beta = \frac{\beta K}{K} = \frac{3}{24} = 0{,}125.$

7. $K_{o.c} = \frac{K}{1 + \beta K} = \frac{24}{1+3} = 6.$

8. $U_{вх} = \frac{U}{K_{o.c}} = \frac{120}{6} = 20$ *в*.

9. $R_{iэ} = \frac{R_i}{1 + \beta\mu} = \frac{23}{1 + 250 \cdot 0{,}125} = 710$ *ом*

Определить коэффициент усиления системы с обратной связью $K_{o.c}$, когда известно ее усилие без обратной связи K, можно с помощью рис. 10, где зависимость $K_{o.c}$ от K дана для разных значений β.

В заключение главы сделаем некоторые обобщающие выводы о свойствах отрицательной обратной связи.

Отрицательная обратная связь любого вида при неизменных параметрах усилителя приводит к уменьшению его коэффициента усиления. Часто бывает возможно сохранить прежнее значение коэффициента усиления, если наряду с использованием отрицательной обратной связи увеличить сопротивление анодной нагрузки. В этом случае возрастание коэффициента усиления из-за роста сопротивления нагрузки компенсируется спадом усиления, обусловленным действием обратной связи. Использование отрицательной обратной связи снижает все виды искажений.

Лучшие результаты дает использование обратной связи по напряжению. Применение обратной связи по току вызывает уменьшение входного сопротивления усилителя и увеличение его выходного сопротивления, что неблагоприятно в отношении уменьшения искажений. Поэтому в современных усилителях низкой частоты используется больше отрицательная обратная связь по напряжению.

При сравнении схем обратной связи по напряжению некоторое предпочтение имеет способ последовательного ее введения на вход, поскольку это вызывает увеличение входного сопротивления каскада. В практических схемах усилителей низкой частоты широко используется как последовательная, так и параллельная связь по напряжению.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

9. КАСКАД С КАТОДНОЙ НАГРУЗКОЙ

Каскад с катодной нагрузкой (рис. 11,*а*), известный под названием «катодного повторителя», применяется главным образом в усилителях видеосигналов телевизионных приемников. В нем сопротивление нагрузки включается в анодную цепь лампы со стороны ее катода. При этом нагрузка оказывается включенной одновременно как в цепь выхода, так и в цепь входа, благодаря чему в кас-

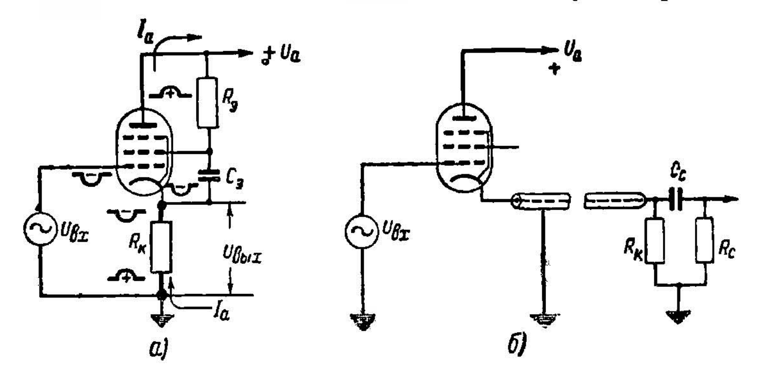


Рис. 11. Катодный повторитель.

каде возникает глубокая отрицательная обратная связь. Анод лампы здесь соединен непосредственно с источником питания, благодаря чему он оказывается заземленным по переменной составляющей анодного тока. Выходное напряжение, снимаемое с катодной нагрузки, совпадает по фазе с входным напряжением. В этом легко убедиться, если рассмотреть действие на сетку одной из полуволн переменного напряжения. Так, например, при отрицательной полуволне напряжения на сетке полуволна напряжения на аноде становится положительной. При этом переменная составляющая анодного тока лампы, имея направление, обозначенное стрелкой, образует на катодной нагрузке выходное напряжение, полярность которого действительно повторяет входное напряжение.

Выходное напряжение в такой схеме целиком поступает на вход каскада и является одновременно напряже-

нием обратной связи. Учитывая, что коэффициент усиления каскада с обратной связью $K_{о.с}=\frac{K}{1+\beta K}$, коэффициент передачи цепи обратной связи в этой схеме $\beta=U_\beta/U_{вых}=1$, получим усиление каскада $K_{о.с}<1$, т. е. катодный повторитель не дает усиления по напряжению.

Наличие в катодном повторителе глубокой отрицательной обратной связи ($\beta=1$) почти полностью устраняет все виды искажений, и, следовательно, форма напряжения на выходе остается такой же, как и на входе. Таким образом, в каскаде с катодной нагрузкой выходное напряжение повторяет входное напряжение не только по фазе, но и по форме; этим самым целиком оправдывается его название повторителя.

Катодный повторитель относится к категории схем с последовательной обратной связью по напряжению, поэтому он обладает большим входным и весьма малым выходным сопротивлением. Это дает возможность использовать его как согласующее устройство с широкополосной частотной характеристикой, например, для подключения к телевизионному приемнику удаленной от него приемной электронно-лучевой трубки с помощью коаксиального кабеля.

К выходу кабеля присоединяют сопротивление $R_к$, равное волновому сопротивлению кабеля (рис. 11,б), напряжение с которого подается на управляющий электрод трубки через цепь C_cR_c.

10. ФАЗОИНВЕРСНЫЕ СХЕМЫ

Усилитель мощности, выполненный по двухтактной схеме, имеет два одинаковых плеча, каждое из которых возбуждается равными по величине и противоположными по фазе напряжениями. Такие напряжения могут быть получены с помощью трансформатора со средней точкой во вторичной обмотке либо от так называемой фазоинверсной схемы. Под фазоинверсией понимают преобразование однофазного напряжеиия в два напряжения, равных по величине и противоположных по фазе.

Действие фазоинверсных схем основано на использовании отрицательной обратной связи. Простейший фазоинвертер представляет собой одноламповый усилитель, нагрузкой которого служат два равных сопротивления $R_а/2$, включенные одно со стороны анода, а другое со стороны

катода (рис. 12). Напряжения на последующий каскад подаются через разделительные цепи $R_c C_c$. Элементы R_t и C_t обеспечивают смещение на сетку лампы.

Напряжение обратной связи $U_э$ снимается на вход каскада с катодного сопротивления $R_a/2$. По величине оно равно половине выходного напряжения. В этом случае $\beta = 0,5$, и, следовательно, коэффициент усиления такого фазоинвертера

$$K_{o.c} = \frac{K}{1+\beta K} = \frac{1}{\frac{1}{K}+\beta} = \frac{1}{\frac{1}{K}+0,5} < 2$$

и не зависит от величины K. Обратная связь по току вызывает повышение эквивалентного выходного сопротивления каскада со стороны анодного плеча, и поэтому симметрия плеч фазоинвертера нарушается. Однако это явление обычно нужно учитывать лишь на высоких частотах.

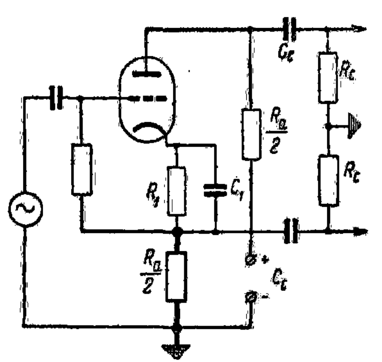


Рис. 12. Фазоинверсная схема с разделенной нагрузкой.

Лучшие результаты в отношении симметрии и в отношении усиления достигаются в двухламповой фазоинверсной схеме с катодной связью (рис. 13).

На сопротивлении $R_к$, включенном в общую цепь катодов обеих ламп, разностью переменных составляющих анодных токов I_{a1} и I_{a2} создается напряжение обратной связи. Глубина обратной связи в такой схеме мала, и поэтому схема дает значительное усиление.

Чтобы обеспечить выполнение неравенства $I_{a1} > I_{a2}$, достаточно незначительно увеличить сопротивление R_{a2} по сравнению с R_{a1}.

Правильность фазирования в такой схеме легко проверить для любой полуволны входного напряжения. Так, для отрицательной полуволны напряжения на сетке лампы $Л_1$ полуволны переменного напряжения на анодах ламп имеют знаки, показанные на рис. 13. Переменные состав-

ляющие анодных токов I_{a1} и I_{a2} при такой полярности переменных напряжений на анодах протекают через лампы в противоположных направлениях, а разностный ток $\Delta I = I_{a1} - I_{a2}$ в цепи общего катодного сопротивления $R_к$ совпадает с направлением тока I_{a1} (так как $I_{a1} > I_{a2}$).

Напряжение обратной связи U_β, созданное разностным током ΔI_a, подводится к сетке лампы $Л_2$ через разделительный конденсатор C_1 и возбуждает ее в противофазе с

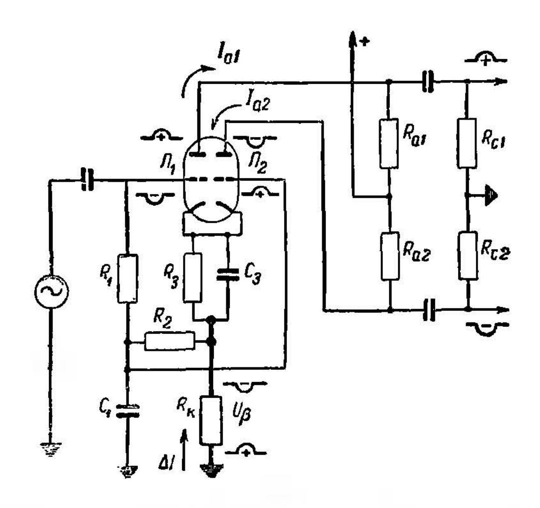


Рис. 13. Фазоинверсная схема с катодной связью.

левым триодом. В результате напряжения на выходе каждого плеча становятся противофазными.

Смещение на сетке обеспечивается элементами R_3C_3 и подается на сетку $Л_1$ через R_1 и R_2 и на сетку $Л_2$ через R_2.

Коэффициент усиления каждого плеча может быть определен по следующей приближенной формуле:

$$K_1 \approx K_2 = \frac{1}{2} \frac{\mu R_a}{R_i + R_a},$$

где R_a — среднее значение анодных нагрузок R_{a1} и R_{a2}. Хорошая симметрия в схеме обеспечивается правильным вы-

бором величины сопротивления $R_к$; ее можно найти по формуле:

$$R_к \approx \frac{R_а (R_i + R_а)}{(1 + \mu)(R_{а2} - R_{а1})}.$$

Значение $R_а$ находится как для обычной схемы усилителя на сопротивлениях. $\Delta R_а = (0{,}02 \div 0{,}04)\, R_а$, $R_{с1} = R_{с2} = (5 \div 10)\, R_а$.

11. ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В УСИЛИТЕЛЯХ С ДВУХТАКТНЫМ ВЫХОДОМ

В усилителях с двухтактным выходным каскадом обратной связью может быть охвачен как этот каскад, так и каскад предварительного усиления.

Рассмотрим основные способы съема напряжения обратной связи с выхода двухтактных каскадов. На рис. 14

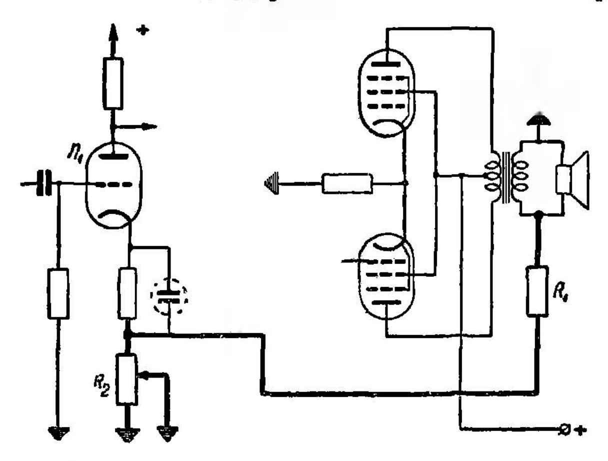


Рис. 14. Усилитель с двухтактным выходом и обратной связью.

напряжение обратной связи снимается со вторичной обмотки выходного трансформатора и подается на вход предоконечного каскада. Здесь цепь обратной связи составлена из сопротивлений R_1 и R_2. Последнее включено в цепь катода лампы $Л_1$. Движок сопротивления R_2 позволяет изменять величину обратной связи.

Напряжение обратной сввзи может быть также полу-

чено со специальных обмоток обратной связи на выходном трансформаторе. В схеме рис. 15,*а* выходной трансформатор Tp_2 имеет две одинаковые дополнительные обмотки *II*. Напряжение обратной связи с них подается на управляющие сетки ламп того же каскада последовательно с напряжением возбуждения, получающимся на вторичных обмотках междулампового трансформатора Tp_1. Смещение на сетки ламп снимается с сопротивления *R*.

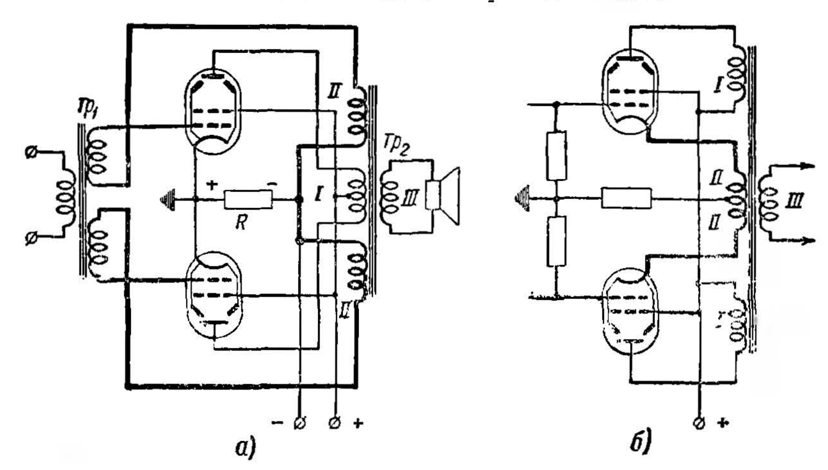


Рис. 15. Обратная связь в двухтактной схеме с применением дополнительных обмоток на выходном трансформаторе.

На рис. 15.*б* напряжение обратной связи с дополнительных обмоток вводится в катодные цепи ламп.

На рис. 16 выходной трансформатор имеет одну дополнительную обмотку, напряжение с которой подается на сетку одного из каскадов предварительного усилителя. Регулировка обратной связи в этом случае осуществляется путем перемещения движка сопротивления *R*, включенного параллельно обмотке обратной связи. Глубина обратной связи в таких схемах зависит от отношения чисел витков обмотки обратной связи и первичной обмотки. Число витков в обмотке обратной связи может быть определено по формуле:

$$w_{oc} = \beta w_1,$$

где β — коэффициент передачи цепи обратной связи;

w_1 — число витков первичной обмотки выходного трансформатора.

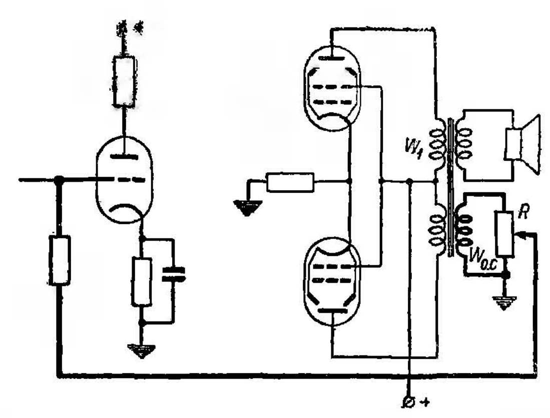


Рис. 16. Обратная связь в усилителе с двухтактным выходом.

В двухтактном каскаде с катодной нагрузкой (рис. 17) выходной трансформатор включен в цепи катодов ламп, и поэтому в усилителе возникает глубокая обратная связь ($\beta=1$). Такому каскаду присущи свойства катодного повторителя, главным из которых является почти полное устранение всех видов искажений. К достоинствам схемы относится возможность использования в ней почти любого понижающего трансформатора в качестве выходного. К таким трансформаторам не предъявляется требование в отношении малой индуктивности рассеивания и определенного коэффициента трансформации. Например, могут быть использованы первичная и накальная обмотки силового трансформатора. Кроме того, для работы громкоговорителя благоприятным является то обстоятельство, что эквивалентное выходное сопротивление каскада в связи с глубокой обратной связью весьма незначительно.

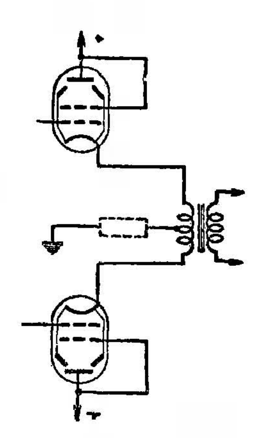


Рис. 17. Схема двухтактного каскада с катодной нагрузкой.

Однако вследствие глубокой отрицательной обратной связи усиление по напряжению каскада меньше единицы, а следовательно, для получения большого напряжения на первичной обмотке выходного трансформатора потребуется

еще большее напряжение возбуждения, подводимое к сеткам ламп. Практически напряжение возбуждения должно иметь величину порядка более 100 *в*, и поэтому в предоконечном каскаде следует использовать усилитель напряжения на мощной лампе.

Отметим, что под усилением выходного каскада подразумевается отношение напряжения на первичной обмотке выходного трансформатора к входному напряжению этого каскада.

12. РЕГУЛИРОВКА ТЕМБРА

Применение в усилителях низкой частоты регулировки тембра дает возможность радиослушателю по своему желанию изменять в некоторых пределах частотную характеристику усилителя, придавая тем самым звуку необходимую окраску.

В простых приемниках или усилителях регуляторы тембра могут только снижать усиление в нижней или верхней области спектра; так, например, при воспроизведении граммзаписи понижение усиления на верхних звуковых частотах устраняет шумы и придает звуку более мягкую окраску. В приемниках высших классов и высококачественных усилителях регуляторы тембра осуществляют как понижение, так и подъем усиления в этих областях частот.

Регулировку тембра можно обеспечить тремя способами: с помощью отрицательной обратной связи, без обратной связи и путем комбинирования этих двух способов. Регулировка тембра с помощью отрицательной обратной связи широко применяется в усилителях низкой частоты и является предметом дальнейшего изложения.

Для регулирования тембра может быть использована так называемая частотно-зависимая отрицательная обратная связь, т. е. связь, глубина которой зависит от частоты. Почти любая отрицательная обратная связь в той или иной мере является частотно-зависимой, однако проявление этой зависимости бывает слабо или резко выраженным и определяется характером цепи обратной связи; так, например, в большинстве ранее рассмотренных схем глубина обратной связи меняется незначительно, поскольку она определяется в основном соотношением активных сопротивлений.

Цепь частотно-зависимой обратной связи составляется из ряда активных и реактивных сопротивлений, соединен-

ных последовательно или параллельно. При этом полное сопротивление цепи меняется с частотой, а вместе с ним изменяется глубина обратной связи.

На рис. 18 приведена схема обратной связи по напряжению, используемая для регулировки тембра в области нижних частот диапазона. Напряжение обратной связи снимается здесь со вторичной обмотки выходного трансформатора и через цепочку обратной связи вводится последовательно в цепь катода лампы одного из каскадов предварительного усиления. Цепь обратной связи является

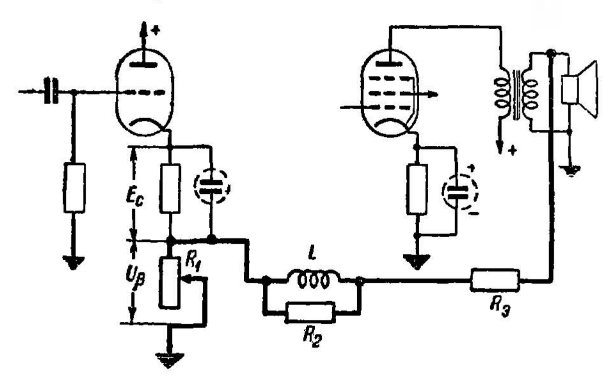


Рис. 18. Схема регулировки тембра в области нижних частот.

делителем напряжения, состоящим из последовательного соединения сопротивлений R_1, R_3 и дросселя L, шунтированного сопротивлением R_2. Переменное сопротивление R_1 включено последовательно в цепь катода; на нем образуется напряжение обратной связи U_β, которое подводится к сетке лампы. Сопротивление дросселя для верхних частот диапазона $\Omega_в L \gg R_1$, и поэтому напряжение U_β для этих частот мало, а обратная связь, по существу, отсутствует. Для области нижних частот сопротивление $\Omega_н L$ и R_1 становятся величинами соизмеримыми, следовательно, напряжение U_β на сопротивлении R_1 зависит от отношения величин этих сопротивлений. При полностью введенном сопротивлении R_1 глубина обратной связи получается наибольшей, что соответствует максимальному спаду усиления в области нижних частот. При выведенном сопротивлении цепь обратной связи замыкается накоротко и обратная связь отсутствует.

Все величины в цепи обратной связи рекомендуется подбирать экспериментально; ориентировочные значения элементов цепи следующие: $R_1 \approx 100$ *ом*, $R_2 = 200 \div 600$ *ом*, $R_3 = 100 \div 300$ *ом*, $L = 10 \div 20$ *мгн*.

Для регулировки тембра в области верхних частот могут быть использованы различные схемы последовательной

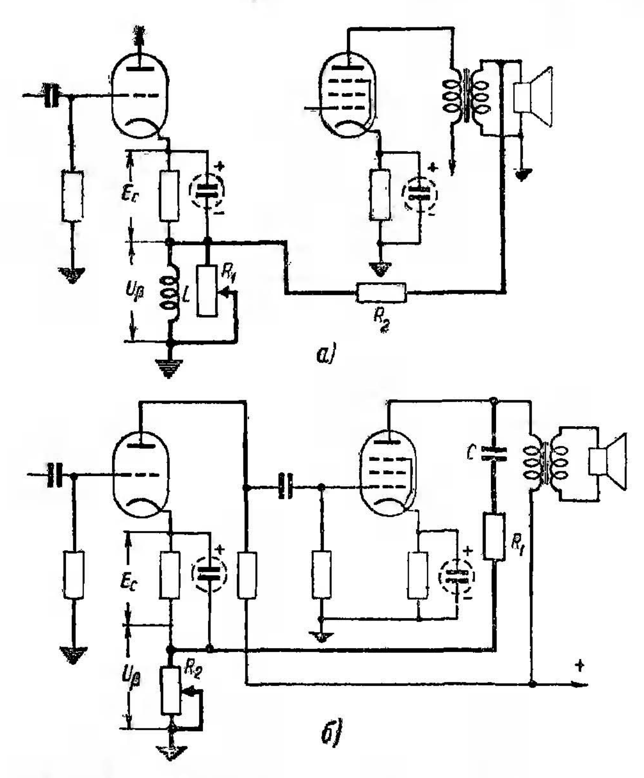


Рис. 19. Схемы регулировки тембра в области верхних частот.

обратной связи по напряжению. На рис. 19,*а* цепь обратной связи образована постоянным сопротивлением R_2, дросселем L и регулирующим сопротивлением R_1. Для нижних частот спектра сопротивление дросселя $\Omega_в L \ll R_2$, и поэтому обратная связь в этой области диапазона отсутствует. В области верхних частот $\Omega_в L$ и R_2 одного порядка, и на дросселе возникает напряжение

обратной связи, величина которого зависит от положения движка сопротивления R_1. При выведенном сопротивлении R_1 дроссель замкнут накоротко и обратная связь отсутствует. При полностью введенном сопротивлении обратная связь имеет наибольшее значение.

При экспериментальном подборе элементов схемы в качестве исходных можно использовать следующие значения: $R_1 \approx 100$ *ом*, $R_2 = 100 \div 200$ *ом*, $L = 10 \div 20$ *мгн*.

В схеме рис. 19,*б* цепь обратной связи CR_1R_2 включена параллельно выходной лампе. Регулировка тембра осуществляется изменением сопротивления R_2, которое включено в цепь катода первой лампы.

В области нижних частот сопротивление $\frac{1}{\Omega_н C} + R_1 \gg R_2$, и поэтому обратная связь отсутствует. На верхних частотах $\frac{1}{\Omega_в C}$ незначительно, на сопротивлении R_2 возникает напряжение обратной связи U_β.

При подборе элементов схемы необходимо учесть, что увеличение глубины обратной связи не следует производить за счет увеличения сопротивления R_2, так как при больших значениях R_2 может возникнуть обратная связь по току, обусловленная током первой лампы. Примерные значения величин следующие: $R_2 = 300 \div 500$ *ом*, $C \approx 10\,000$ *пф*, R_1 находится в пределах десятков *ком*.

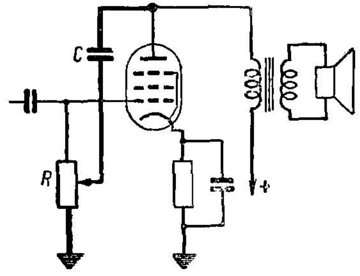


Рис. 20. Регулировка тембра в области верхних частот с помощью параллельной обратной связи.

На рис. 20 показана схема оконечного каскада с параллельной обратной связью по напряжению, позволяющая осуществлять регулировку тембра в области верхних частот. Напряжение обратной связи снимается с анода лампы и подается на ее управляющую сетку через конденсатор небольшой емкости (порядка 100 *пф*). Обратная связь в такой схеме возникает в основном в области верхних частот, поскольку емкостное сопротивление конденсатора в цепи обратной связи для этих частот является небольшим. Регулировка тембра осуществляется переменным сопротивлением в цепи сетки величиной 0,3—0,5 *Мом*.

Схема рис. 21 позволяет осуществить подъем усиления в области нижних и верхних частот спектра. Принцип ее действия основан на значительном понижении усиления в области средних частот, вследствие чего нижние и верхние частоты оказываются «подчеркнутыми». В схеме использована нерегулируемая частотно-зависимая отрицательная обратная связь, относящаяся к категории параллельной связи по напряжению. Цепь обратной связи состоит из сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4 и конденсаторов C_1, C_2. Сопротивления R_3 и R_4 являются одновременно нагрузкой лампы предоконечного каскада. Сопротивление цепи обратной связи зависит от частоты, и поэтому глубина обратной связи изменяется по диапазону.

В области нижних частот емкостные сопротивления конденсаторов C_1 и C_2 достаточно велики и, следовательно, их влияние на обратную связь сказывается слабо. В области средних частот проявляется главным образом шунтирующее действие конденсатора C_2, так как оно включено параллельно большому сопротивлению. При этом обратная связь возрастает, а усиление падает. На верхних частотах, помимо действия емкости C_2, проявляется также шунтирующее действие конденсатора C_1, что влечет за собой падение усиления в этой области частот.

Схема, представленная на рис. 20, используется в некоторых приемниках французской фирмы ARCO. Глубина обратной связи на средних частотах $\beta \approx 10\%$. Величины, показанные на схеме, могут явиться исходными при практическом осуществлении такой обратной связи.

На рис. 22 изображен двухкаскадный усилитель с регулируемой частотно-зависимой последовательной обратной связью по напряжению, позволяющей осуществлять подъем усиления как в области нижних, так и в области верхних частот. Цепь обратной связи состоит из элементов C_1, C_2, R_1, R_2, R_3, C_3, R_4 и $R_к$. Переменным сопротивлением R_1 регулируется усиление нижних, а сопротивлением R_4 — верхних частот. Сопротивление R_1 включено параллельно конденсатору C_2, емкостное сопротивление которого для нижних частот значительно; поэтому, изменяя величину R_1, можно изменять сопротивление участка R_1C_2, а тем самым и обратную связь на нижних частотах. При минимальном значении R_1 обратная связь на нижних частотах наиболее глубокая, а усиление минимально. При увеличении R_1 обратная связь уменьшается, коэффициент усиления на

нижних частотах растет, а полоса пропускания расширяется.

Конденсатор C_3 вместе с сопротивлением R_4 шунтирует на верхних частотах участок цепи обратной связи, состоящий из R_3 и $R_к$. В зависимости от величины R_4 его шунтирующее действие возрастает или уменьшается, а следовательно, изменяется напряжение обратной связи на сопротивлении $R_к$. При максимальном значении R_4 обратная связь получается наибольшей и в области верхних частот получается значительный спад усиления. При выве-

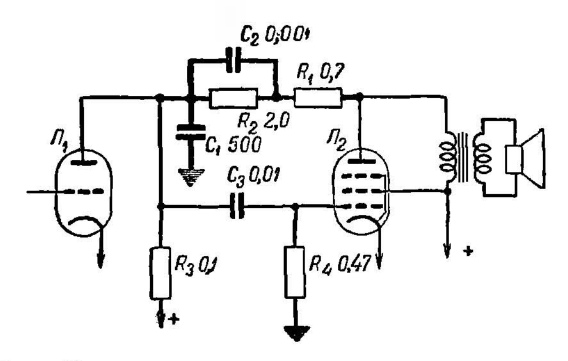


Рис. 21. Схема, обеспечивающая подъем усиления на верхних и нижних частотах.

денном сопротивлении R_4 сопротивление $R_к$ шунтируется конденсатором C_3, обратная связь не действует и усиление получается максимальным. Еще одна схема с раздельной регулировкой тембра на краях частотного диапазона показана на рис. 23. Напряжение обратной связи снимается с анода лампы оконечного каскада и подается через сложную цепь отрицательной обратной связи на его сетку. В цепь обратной связи включены переменные сопротивления R_3 и R_4, осуществляющие регулировку тембра. Элементы схемы R_2 и C_2 подобраны так, чтобы обеспечить некоторый спад усиления на средних и верхних частотах по сравнению с нижними частотами. Сопротивлением R_3 осуществляется регулировка усиления в области нижних частот; оно включено параллельно конденсатору C_3 и шунтирует его. При минимальной величине R_3 шунтирование конденсатора C_3 наибольшее, обратная связь возрастает, а усиление на нижних частотах падает. При полностью

введенном сопротивлении R_3 достигается подъем усиления.

Регулирование тембра в области верхних частот осуществляется сопротивлением R_4, которое вместе с конденсатором C_4 блокируют часть цепи обратной связи в верх-

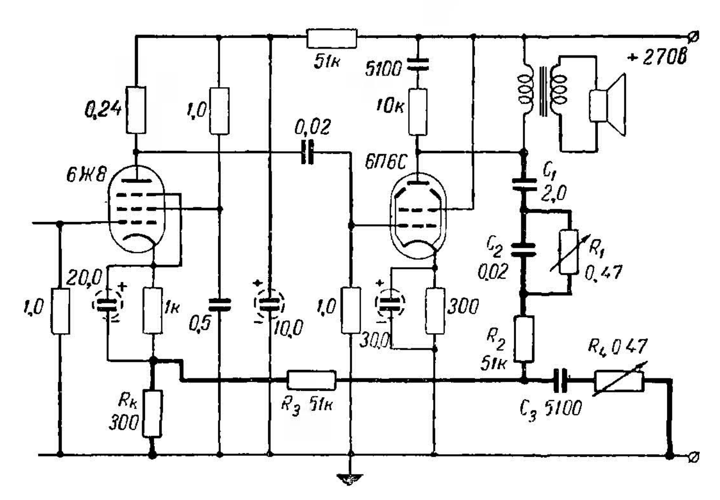


Рис. 22. Схема усилителя с частотно-зависимой обратной связью.

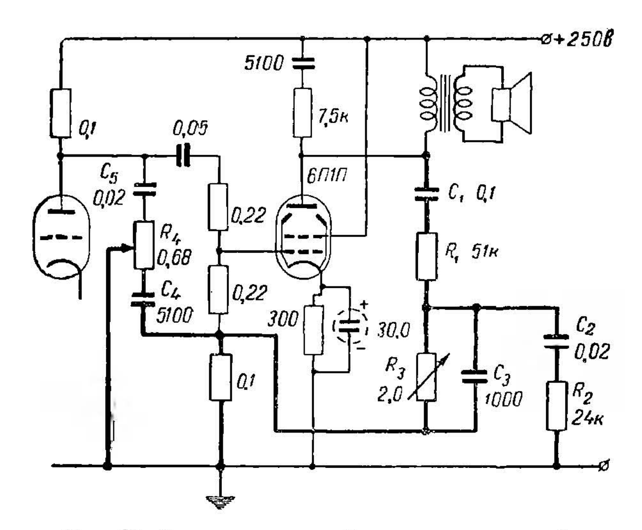


Рис. 23. Схема раздельной регулировки тембра иа верхних и нижних частотах.

ней области частот. В нижнем положении движка обратная связь неглубокая и усиление на верхних частотах возрастает, в верхнем его положении усиление уменьшается вследствие шунтирования анодной нагрузки лампы предыдущего каскада конденсатором C_5.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

13. РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ПРИЕМ

Положительная обратная связь, если она является искусственной, а не паразитной, может быть постоянной и регулируемой.

Установим основные свойства регенеративного каскада с помощью схемы, приведенной на рис. 24,*а*.

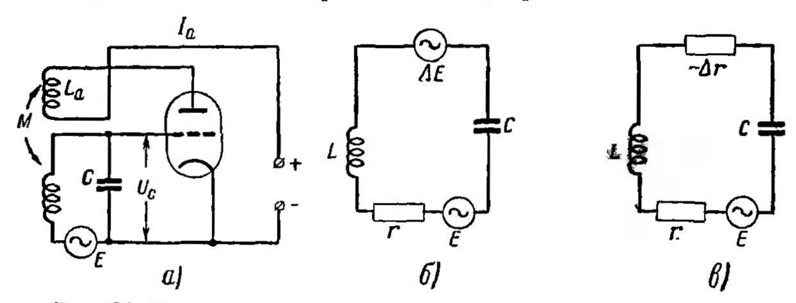


Рис. 24. Принципиальная схема регенеративного каскада (*а*) и его эквивалентные схемы (*б* и *в*).

Сеточный контур каскада возбуждается э. д. с. E и настроен в резонанс с поступающими колебаниями. Ток в контуре $I_к$ создает на конденсаторе C падение напряжения $\dot{U}_с = I_к \frac{1}{\omega C}$, которое прикладывается к сетке лампы. Сеточное напряжение, управляя электронным потоком, создает в анодной цепи переменную составляющую анодного тока:

$$I_а \approx SU_с = SI_к \frac{1}{\omega C}.$$

В анодную цепь лампы включена катушка обратной связи $L_а$, связанная через магнитный поток с катушкой

контура L. Проходящая через катушку $L_а$ переменная составляющая анодного тока образует вокруг нее переменное магнитное поле, благодаря чему в катушке контура L индуктируется э. д. с. Эта э. д. с. при соответствующем включении катушки обратной связи совпадает по фазе с основной э. д. с. E и может быть названа э. д. с. обратной связи. Действие обратной связи на контур представлено эквивалентными схемами.

На рис. 24,*б* э. д. с. обратной связи показана дополнительным генератором ΔE, а сопротивление r характеризует собственные потери в контуре. Э. д. с. обратной связи

$$\Delta E = I_а \omega M,$$

где ωM — сопротивление связи;

M — коэффициент взаимоиндукции.

Воспользовавшись выражением для $I_а$, получим:

$$\Delta E = I_к S \frac{1}{\omega C} \omega M \text{ или } \Delta E = I_к \frac{MS}{C}.$$

Последнее выражение по своей структуре может быть только произведением тока на сопротивление, т. е. $\Delta E = I_к \Delta r$, и поэтому дробь $\frac{MS}{C}$ и есть не что иное, как сопротивление:

$$\Delta r = \frac{MS}{C}$$

Размерность этой дроби соответствует размерности сопротивления, так как $\frac{гн}{ф} = ом^2$.

Количественную оценку влияния положительной обратной связи на работу каскада можно дать путем определения тока в контуре. При резонансе

$$I_к = \frac{E + \Delta E}{r}.$$

Заменим ΔE ее значением, тогда

$$I_к = \frac{E + I_к \Delta r}{r}.$$

В результате решения этого уравнения относительно $I_к$ получим:

$$I_к = \frac{E}{r - \Delta r}.$$

На основании последней формулы регенератор может быть представлен новой эквивалентной схемой (рис. 24,*в*). Здесь вместо э. д. с. обратной связи ΔE в контур включено дополнительное отрицательное сопротивление — Δr.

Понятие отрицательного активного сопротивления имеет следующий физический смысл: если положительное активное сопротивление характеризует необратимые потери электрической энергии, выделяемой в виде тепла, то отрицательное активное сопротивление, наоборот, определяет источник электрической энергии. В нашем конкретном случае появление добавочного источника энергии объясняется тем, что последняя через обратную связь черпается из анодной цепи лампы и подается в сеточный контур. Результатом этого является уменьшение общих потерь энергии в контуре и, следовательно, возрастание амплитуды колебаний в нем.

Эквивалентное активное сопротивление контура под воздействием обратной связи

$$r_э = r - \Delta r = r - \frac{MS}{C}.$$

С увеличением обратной связи сопротивление $r_э$ уменьшается, а следовательно, добротность эквивалентного контура возрастает. Добротность контура, как известно, является величиной, показывающей, во сколько раз напряжение на выходе контура возрастает по сравнению с напряжением, подводимым к его входу. Поэтому увеличение добротности эквивалентного контура под воздействием положительной обратной связи повышает коэффициент усиления регенератора, что равнозначно росту его чувствительности.

Действие положительной обратной связи сказывается также на избирательности регенератора. Наглядное представление об избирательных свойствах контуров дают резонансные кривые (рис. 25). Более острая кривая характеризует резонансные свойства контура при наличии обратной связи; его эквивалентная добротность Q_1 больше, чем добротность Q_2 контура без обратной связи. Мерилом избирательности на графике служит ордината, показывающая степень ослабления сигнала соседней по частоте станции при определенной расстройке Δf_1. Так, ордината Y_1 показывает, что сигнал соседней станции при действии обратной связи ослабляется больше, чем при ее отсутствии (Y_2).

На графике также видно, что обострение резонансной кривой вследствие положительной обратной связи вызывает сужение полосы пропускания.

Из формулы, характеризующей эквивалентное активное сопротивление $r_э$ контура, следует, что путем изменения $\Delta r = \frac{MS}{C}$ можно влиять на добротность эквивалентного контура и тем самым изменять чувствительность и избирательность системы. Наибольший эффект от действия положительной обратной связи достигается тогда, когда сопротивление Δr приближается по абсолютной величине к r, а $r_э$, оставаясь положительным, приближается к нулю.

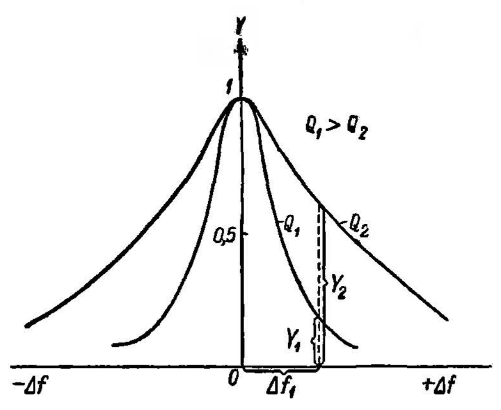


Рис. 25. Резонансные кривые колебательного контура с обратной связью и без нее.

Такое состояние регенератора называют пороговым. При дальнейшем увеличении Δr сопротивление $r_э$ становится равным нулю или приобретает отрицательный знак. Наличие в контуре отрицательного активного сопротивления является условием для возникновения в нем незатухающих колебаний, иначе говоря, превращения усилительной системы в генераторную. Работа регенератора в пороговом состоянии неустойчива; незначительное изменение крутизны характеристики лампы может вызвать самовозбуждение регенератора, при котором нормальный прием сигналов нарушается. Другим недостатком регенератора является зависимость его настройки от величины обратной связи. Последнее явление вызывается тем, что в сеточный контур наряду с активным сопротивлением $-\Delta r$ вносится также

реактивное сопротивление ΔX, вызывающее расстройку каскада. Отметим специфическую особенность регенеративного приема. Обычно поиск радиотелефонных станций производится при значительной глубине обратной связи в режиме генерации. Собственную частоту генерации меняют до тех пор, пока ее величина не будет близка к частоте принимаемого сигнала. Об этом можно судить по возникновению в громкоговорителе или телефоне специфичного свиста, исчезающего при незначительном изменении емкости переменного конденсатора контура. Появление свиста объясняется тем, что на детектор одновременно воздействуют два сигнала высокой частоты: сигнал принимаемой станции и собственные колебания генератора. Если частота генерации близка к частоте принимаемого сигнала, то на выходе детектора возникают биения с звуковой частотой.

По высоте тона биений можно судить о точности настройки: чем ниже тон, тем меньше разница по частоте между двумя сигналами и тем, следовательно, точнее настройка приемника. После такой настройки обратную связь постепенно уменьшают до прекращения генерации, при этом свист исчезает, а в телефоне слышны неискаженные сигналы принимаемой станции. Не следует забывать, что при таком способе настройки антенна приемника излучает, а регенератор становится источником помех. В целях уменьшения излучения перед регенеративным каскадом включают хотя бы один каскад усиления высокой частоты.

14. СХЕМЫ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ КАСКАДОВ

Различие схем регенеративных каскадов связано со способом осуществления положительной обратной связи и способом ее регулировки. Кроме того, в практических схемах положительная обратная связь сочетается обычно с сеточным детектированием, и поэтому подобные схемы часто называют регенеративным сеточным детектором. Классической схемой регенератора является схема с индуктивной обратной связью (рис. 26). Цепь R_1C_1 обеспечивает автоматическое смещение на сетку лампы, необходимое для работы ее в качестве сеточного детектора. Напряжение низкой частоты с нагрузки R_2 снимается на вход последующего каскада через разделительный конденсатор $C_р$. В анодной цепи наряду с составляющей тока низкой частоты имеется составляющая тока высокой частоты.

Для получения на сопротивлении нагрузки R_2 напряжения, изменяющегося только по закону низкой частоты, оно блокируется емкостью C_2, представляющей для тока высокой частоты незначительное по сравнению с R_2 емкостное сопротивление. Регулировка обратной связи производится из-

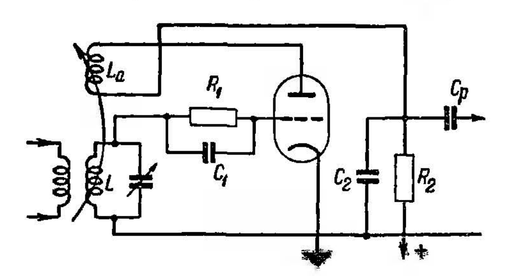


Рис. 26. Схема регенератора с индуктивной обратной связью.

менением коэффициента взаимоиндукции M путем относительного перемещения катушек L_a и L. Действие положительной обратной связи, как мы уже говорили, вызывает изменение эквивалентного сопротивления контура $r_э$. Ве-

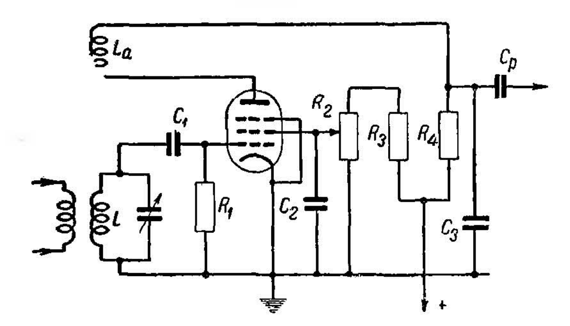


Рис. 27. Регулировка обратной связи изменением крутизны характеристики лампы.

личина его зависит не только от коэффициента взаимоиндукции M, но и от крутизны характеристики лампы S. Это дает возможность регулировать обратную связь изменением не взаимоиндукции M, а крутизны характеристики S. На рис. 27 показана подобная схема регенеративного сеточного детектора, в которой используется пентод высокой частоты; здесь, так же как и в предыдущей схеме, осу-

ществлена индуктивная положительная обратная связь между катушками L и $L_а$. Взаимное расположение катушек в такой схеме сохраняется постоянным, а регулировка обратной связи осуществляется изменением крутизны S лампы путем изменения напряжения на экранной сетке пентода с помощью переменного сопротивления R_2.

Положительную обратную связь применяют также в малоламповых супергетеродинных приемниках в целях

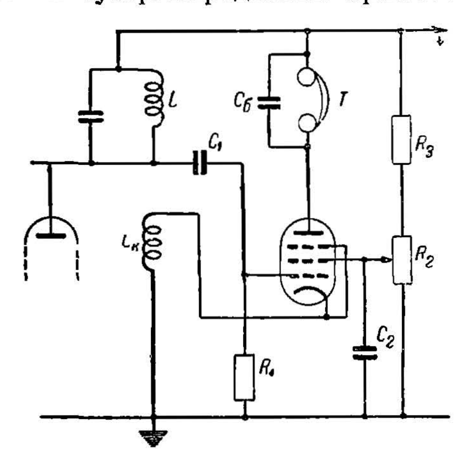


Рис. 28. Схема регенеративного каскада приемника РЛ-4.

повышения их чувствительности и улучшения избирательности по соседнему каналу. Схема второго детектора супергетеродина с обратной связью приведена на рис. 28; здесь катушка обратной связи $L_к$ включена в анодную цепь со стороны катода лампы, а регулировка обратной связи осуществляется изменением напряжения на экранной сетке с помощью потенциометра R_2.

На рис. 29 показана схема каскада усиления промежуточной частоты с положительной обратной связью. Катушка обратной связи $L_о$, включенная в цепь катода через разделительный конденсатор, шунтирована переменным сопротивлением R, позволяющим изменять величину обратной связи. При промежуточной частоте 465 *кгц* и использовании лампы 6К1П катушка обратной связи имеет 15—20 витков провода ПШД 0,15, $R=25$ *ом* и $C=0{,}1$ *мкф*. Для ламп с большей крутизной число витков следует уменьшить, а сопротивление подобрать экспериментально.

Заметим, что применение положительной обратной связи в супергетеродинных приемниках, имеющих автоматическую регулировку усиления, влечет за собой автоматическую регулировку его полосы пропускания. Действие АРУ, как известно, основано на автоматическом изменении смещения на сетках регулируемых ламп в зависимости от интенсивности принимаемого сигнала. При этом изменяется крутизна характеристики лампы, а следовательно, и величина переменной составляющей анодного тока. При воздействии мощного сигнала крутизна S падает, что вызывает уменьшение анодного тока и вместе с тем глубины обратной связи. При этом полоса пропускания расширяется, что способствует улучшению качества воспроизведения программы. При слабом сигнале полоса сужается, благодаря чему облегчается отстройка от мешающих сигналов.

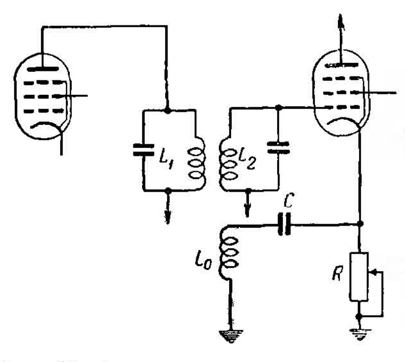


Рис. 29. Схема усилителя промежуточной частоты с положительной обратной связью.

Для повышения избирательности приемника по зеркальному каналу положительная обратная связь может быть использована в усилителе высокой частоты.

15. СХЕМЫ КАСКАДОВ С ОДНОВРЕМЕННЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ И ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ

Основные недостатки регенеративного каскада могут быть в значительной мере устранены путем введения в схему отрицательной обратной связи. Одна из схем подобного вида изображена на рис. 30. Для создания положительной и отрицательной обратных связей в катодную цепь лампы включены катушки $L_о$ и сопротивление $R_к$. Отрицательная обратная связь осуществляется с помощью сопротивления $R_к$ и относится к категории обратной связи по току. Положительная обратная связь создается через взаимоиндукцию между катушкой контура $L_к$ и катушкой обратной связи $L_о$. Напряжение отрицательной обратной

связи образуется на сопротивлении $R_к$ и подается на управляющую сетку лампы через L_0 и C_1; малость реактивных сопротивлений этих элементов по сравнению с $R_к$ позволяет пренебречь их влиянием на глубину отрицательной обратной связи и дает основание считать ее постоянной.

Что же касается положительной обратной связи, то последняя носит частотно-зависимый характер. При неизменной величине коэффициента взаимоиндукции M наибольшее влияние положительная обратная связь оказывает на частоту резонанса, так как сопротивление сеточно-

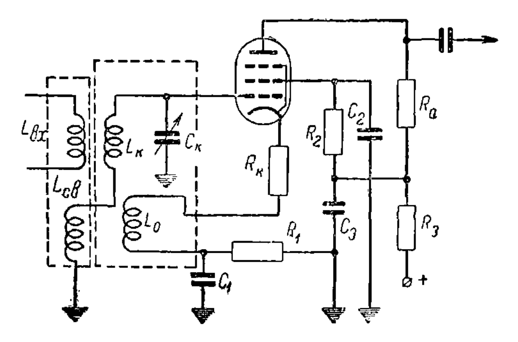


Рис. 30. Схема регенератора с дополнительной отрицательной обратной связью.

го контура Z при этом становится максимальным, напряжение на сетке и вместе с ним переменная составляющая анодного тока I_a также становятся наибольшими, а следовательно, наводимая в контуре э. д. с. обратной связи $E_{о\,с} = I_a \omega M$ приобретает максимальное значение. На частотах, отличных от резонанса, сопротивление контура и напряжение на нем уменьшаются, анодный ток становится меньше и наводимая э. д. с. обратной связи падает. Таким образом, по мере удаления от резонансной частоты влияние положительной обратной связи уменьшается.

Величина каждого из видов обратных связей подобрана таким образом, чтобы их действие на резонансной частоте было полностью скомпенсировано. Тогда на частотах, отличных от резонансной, результирующая обратная связь приобретает отрицательный знак, а степень ее влияния возрастает по мере удаления от резонансной частоты.

В конечном счете действия такой отрицательной обратной связи приводят к резкому обострению резонансной кривой, что равноценно значительному повышению добротности контура. По литературным источникам, добротность в подобной схеме может доходить до 1 000.

Сопротивление $R_а$ на схеме рис 30 является анодной нагрузкой каскада, R_1C_1 обеспечивают необходимое смещение на управляющую сетку лампы, R_2C_2 и R_3C_3 являются развязывающими фильтрами в соответствующих цепях. Связь контура $L_кC_кL_{св}$ с предыдущим каскадом (или с антенной) осуществляется с помощью катушки связи $L_{св}$; последняя помещена совместно с катушкой $L_{вх}$ в отдельном экране. Подобную схему можно использовать для усиления как высокой, так и промежуточной частоты.

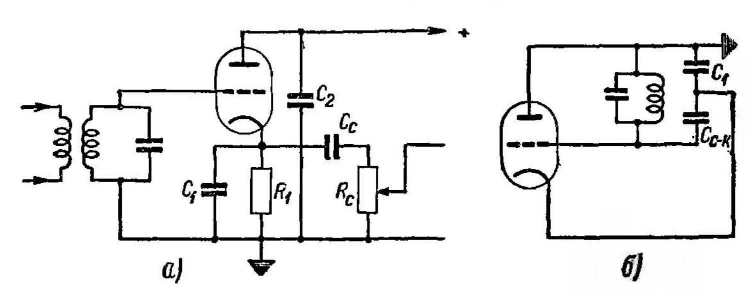


Рис. 31. Катодный детектор.

Налаживание такого каскада производят в следующей последовательности: при отключенных обратных связях определяют напряжение на выходе приемника, затем включают положительную обратную связь; ее действие определяется по возрастанию выходного напряжения. Величину обратной связи целесообразно довести до порогового состояния путем перемещения катушки $L_о$. После этого вводят отрицательную обратную связь. Путем изменения сопротивления $R_к$, которое при налаживании должно быть переменным, добиваются полной компенсации действия положительной обратной связи на резонансной частоте. Об этом можно судить по показаниям выходного прибора, которое должно получиться таким же, каким оно было при отключенных обратных связях.

К категории схем с двумя видами обратной связи относится также катодный детектор (рис. 31,*а*). В этой схеме

имеются одновременно отрицательная обратная связь по низкой частоте и положительная обратная связь по высокой частоте. Наличие отрицательной обратной связи обусловлено включением нагрузки в цепь катода лампы. Конденсатор C_1, включенный параллельно нагрузке, не препятствует действию отрицательной обратной связи на низкой частоте, поскольку емкость его мала. Конденсатор C_2 заземляет анод по высокой частоте.

О существовании положительной обратной связи по высокой частоте можно судить по эквивалентной схеме (рис. 31,*б*). Колебательный контур включен между сеткой

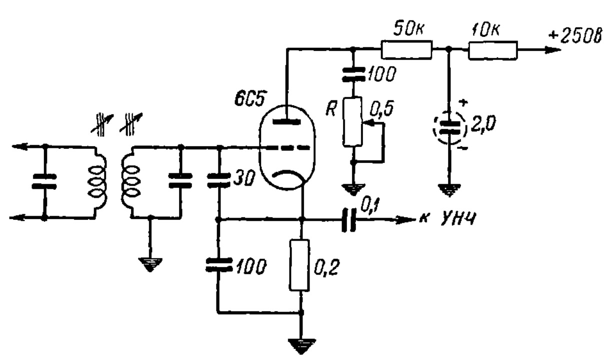


Рис. 32. Схема регенеративного катодного детектора.

и заземленным по высокой частоте анодом. Параллельно контуру включен конденсатор C_1 и емкость промежутка сетка — катод $C_{с\text{-}к}$, которые образуют емкостный делитель напряжения. Напряжение обратной связи снимается с емкости $C_{с\text{-}к}$ и подается в цепь сетки лампы. Глубина обратной связи в такой схеме зависит от отношения $C_1/C_{с\text{-}к}$. Детектирование в катодном детекторе, так же как и в анодном, происходит вследствие нелинейности характеристики анодного тока в ее нижней части. По своим свойствам катодный детектор близок к диодному детектору.

Коэффициент передачи напряжения катодного детектора из-за глубокой отрицательной обратной связи, так же как и в диодном детекторе, меньше единицы. По той же причине его входное сопротивление велико, вследствие чего он в отличие от диодного детектора слабо шунтирует контур предыдущего каскада и поэтому мало влияет на избирательность и усиление последнего.

Катодный детектор не боится перегрузок. Наличие положительной обратной связи по высокой частоте способствует повышению эквивалентной добротности сеточного контура, что приводит к увеличению напряжения на входе детектора. Если в такой схеме изменять величину положительной обратной связи, то схема может быть использована в качестве регенеративного катодного детектора. На рис. 32 показан способ регулирования положительной обратной связи с помощью переменного сопротивления R. Схема такого каскада может быть применена в супергетеродинном приемнике в качестве регенеративного детектора.

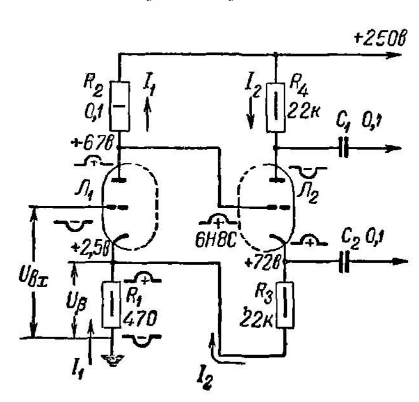


Рис. 33. Фазоинвертер с положительной обратной связью на предыдущий каскад.

Интересная схема фазоинвертера с разделенной нагрузкой и положительной обратной связью на предыдущий каскад приведена на рис. 33.

Фазоинвертер с разделенной нагрузкой, как мы уже знаем, охвачен отрицательной обратной связью по току и поэтому обладает незначителным усилением. В приведенной схеме сопротивление R_3 в катоде инвертера соединено последовательно с катодным сопротивлением R_1 предыдущего каскада, благодаря чему в первом каскаде возникает положительная обратная связь по току и коэффициент усиления такой двухкаскадной схемы повышается. Для уточнения знака обратной связи рассмотрим мгновенную полярность напряжений и направления токов на схеме для отрицательной полуволны входного напряжения. При указанной на схеме полярности переменные составляющие токов I_1 и I_2 протекают через сопротивление R_1 навстречу. Ток I_2, обусловленный бо́льшим, чем ток I_1, сеточным напряжением, значительно превышает I_1, и поэтому разностный ток в сопротивлении R_1 совпадает по направлению с I_2. Таким образом, на сопротивлении R_1 возникает напряжение положительной обратной связи $U_β$, которое вместе с напряжением $U_{вх}$ увеличивает результирующее напряжение на сетке $Л_1$.

16. СВЕРХРЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ПРИЕМ

Сверхрегенератор, так же как и регенератор, относится к категории приемников с применением положительной обратной связи. Однако в основу действия сверхрегенератора заложен совершенно иной принцип. Величина положительной обратной связи при сверхрегенеративном приеме не является постоянной, а периодически меняется между своими двумя крайними значениями. В один из интервалов времени в систему вводится обратная связь такой величины, при которой в ней возникает самовозбуждение и она превращается в автогенератор; в другой интервал времени обратная связь либо выводится полностью, либо оказывается незначительной и возникшие в первый интервал времени колебания затухают. Таким образом, колебательный процесс при сверхрегенерации приобретает форму периодических вспышек генерации, частота повторения которых выбирается за пределами звукового спектра, благодаря чему их прослушивание в выходном устройстве исключается. Действие сверхгенератора основано на том, что возникающие в нем вспышки колебаний управляются принимаемым сигналом и повторяют закон его изменения.

Одним из способов осуществления прерывистой генерации является использование вспомогательного генератора, который периодически со сверхзвуковой частотой подает на сетку лампы сверхрегенератора дополнительное переменное смещение. При этом крутизна характеристики лампы в начальной рабочей точке выбирается из условия получения в сверхрегенераторе режима, близкого к пороговому; в положительные полупериоды вспомогательного напряжения рабочая точка сдвигается вправо, крутизна характеристики возрастает, глубина обратной связи становится наибольшей и система переходит в режим генерации. При отрицательном полупериоде рабочая точка сдвигается влево, крутизна характеристики и вместе с ней обратная связь резко уменьшаются, а колебания в сверхрегенераторе затухают. Следует особо отметить, что колебательный процесс в сверхрегенераторе обусловлен воздействием на него электрических толчков, возникающих в самом приемнике, либо воздействием сигналов из антенны. При этом амплитуда вспышек генерации зависит от уровня поступающего сигнала. Слабому сигналу соответствуют серии вспышек незначительной величины, как это показано

на рис. 34,*а*, а при воздействии мощных сигналов амплитуда вспышек возрастает.

Зависимость амплитуды вспышек от уровня внешнего сигнала как раз и является тем обстоятельством, благодаря которому сверхрегенератор может быть использован в качестве приемника. На рис. 35 приведен график, иллюстрирующий процесс приема амплитудно-модулированных колебаний. На нем показано, что сигналы, поступающие

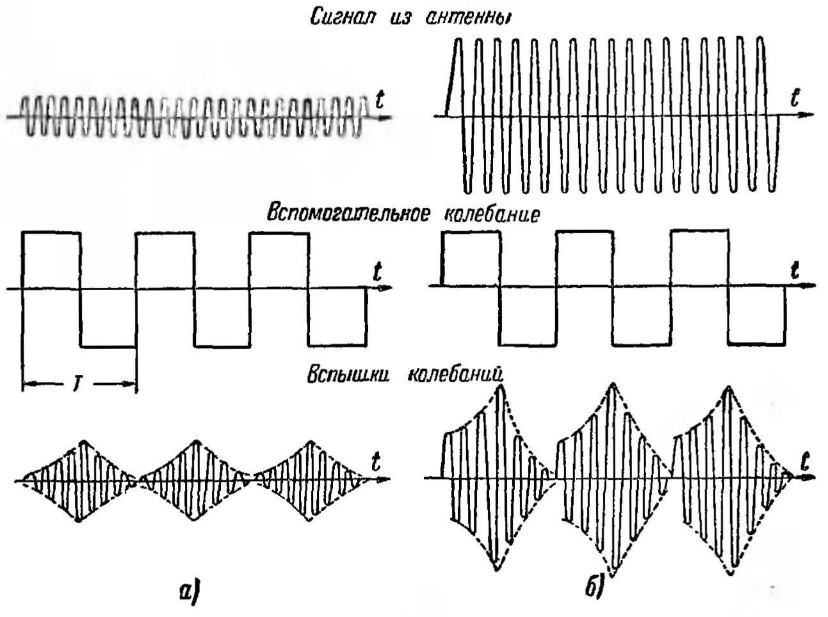


Рис. 34. К вопросу о физических процессах при сверхрегенерации

на вход сверхрегенератора, возбуждают в нем вспышки генерации, повторяющие по форме закон модуляции.

Основным достоинством сверхрегенератора является его чрезвычайно высокая чувствительность, находящаяся на уровне внутриприемных шумов, исчисляемая по напряжению единицами микровольт. Такая чувствительность равнозначна усилению, превышающему миллион и более. Если реализация столь высокой чувствительности в приемниках всех других категорий достигается путем использования многокаскадных усилителей, то в сверхрегенераторе она обеспечивается за счет собственной энергии одного сверхрегенеративного каскада, управляемого весьма сла-

быми сигналами из антенны. Помимо высокой чувствительности, сверхрегенератор обладает большой помехоустойчивостью. Как следует из самого принципа действия сверхрегенератора, воздействие на него внешнего сигнала происходит только в моменты времени, соответствующие началу вспышки; дальнейшее возрастание амплитуды происходит, помимо внешнего сигнала, в силу нарастания колебательного процесса; это означает, что действие внешних

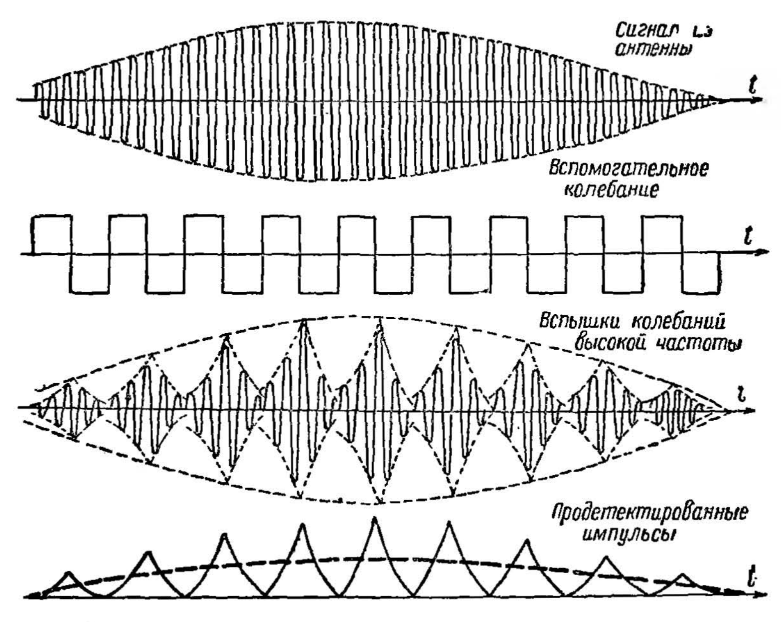


Рис. 35. Процессы в сверхрегенераторе при приеме амплитудно-модулированных колебаний.

помех на сверхрегенератор осуществляется лишь в те короткие интервалы времени, когда он восприимчив к воздействию внешнего сигнала.

Сверхрегенератор, обладая высокой помехоустойчивостью в отношении внешних помех, в то же время сильно восприимчив к внутриприемным шумам; это опять также вытекает из принципа его действия, в результате которого колебательный процесс в нем возникает под воздействием любых слабых сигналов, включая внутриприемные шумы.

К недостаткам сверхрегенератора относится его низкая избирательность, а также наличие излучения, являющего-

ся источником помех для других приемников. То обстоятельство, что сверхрегенератор работает в режиме прерывистых колебаний, означает, что активное эквивалентное сопротивление контура периодически изменяется с частотой вспомогательного генератора. В результате этого резонансная кривая сверхрегенератора имеет ряд максимумов, расположенных с интервалами, равными частоте вспомогательных колебаний (рис. 36). Путем расширения этих частотных интервалов избирательные свойства сверхрегенератора улучшаются; для этого необходимо, чтобы со-

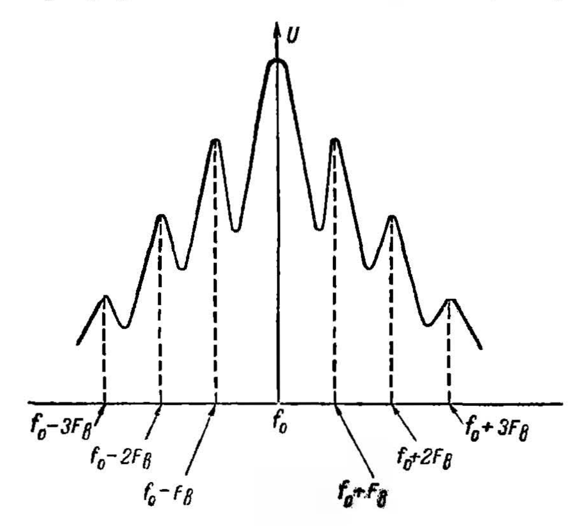


Рис. 36. Резонансная кривая сверхрегенератора.

отношение между принимаемой и вспомогательной частотами достигало величины не менее 100.

Это обстоятельство ограничивает использование сверхрегенерации в любом диапазоне частот. Минимальная частота, на которой возможна работа сверхрегенератора, определяется из ряда простых соображений. Число вспышек генерации, с помощью которых воспроизводится форма огибающей кривой модулированного сигнала, должно быть, как установлено, не менее 4—5. Принимая во внимание соотношение между высокой и вспомогательной частотами, следует считать, что в каждой вспышке должно содержаться, скажем, 100 колебаний. Если, наконец, высшую частоту модуляции принять равной 6 000 *гц*, то в результате перемножения указанных чисел получим частоту по-

рядка 3 *Мгц*, что соответствует длине волны 100 *м*. Практически лучшие результаты сверхрегенеративный прием дает в диапазоне УКВ.

Сверхрегенераторы могут быть также использованы для приема частотно-модулированных сигналов без какой-либо переделки схемы. В этом случае контур сверхрегенератора несколько расстраивается относительно центральной частоты частотно-модулированного сигнала и выпол-

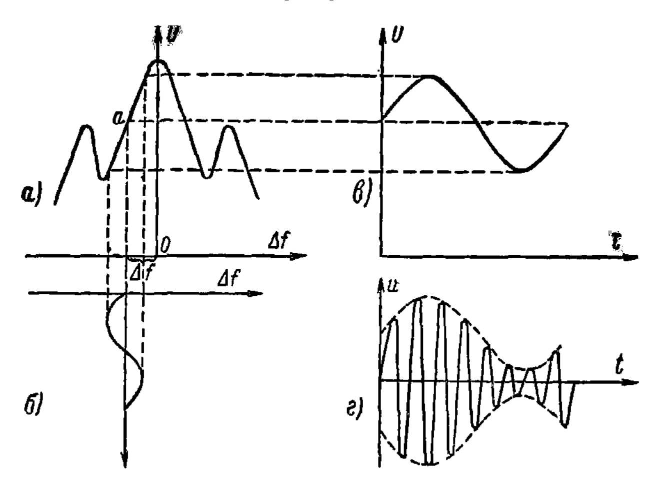


Рис. 37. Процесс преобразования частотно-модулированного колебания в амплитудно-модулированное.

а—резонансная кривая сверхрегенератора; *б*—отклонение частоты при частотной модуляции; *в*—огибающая высокочастотного напряжения после преобразования; *г*—преобразованное высокочастотное колебание.

няет роль преобразователя частотно-модулированных колебаний в амплитудно-модулированные (рис. 37).

При расстройке контура положение рабочей точки на резонансной характеристике смещается с ее вершины в наклонную часть (точка *а*). Отклонение частоты от ее центрального значения по закону модуляции вызывает перемещение рабочей точки по наклонному участку резонансной кривой вверх и вниз относительно ее первоначального положения и создает изменения напряжения на контуре. Таким образом любому приращению частоты сигнала будет соответствовать приращение напряжения на контуре и, следовательно, частотные изменения сигнала преобразуются в его амплитудные изменения. Преобразо-

ванный таким образом сигнал детектируется в сверхрегенераторе обычным образом. Отметим, что величина приращения напряжения зависит от крутизны резонансной кривой. Лучшие результаты получаются при высокой добротности контура, т. е. при острой резонансной характеристике.

Сверхрегенераторы рекомендуется использовать для создания малогабаритной, преимущественно переносной аппаратуры. В целях устранения собственного излучения на входе сверхрегенератора следует иметь хотя бы один высокочастотный каскад.

17. СХЕМЫ СВЕРХРЕГЕНЕРАТОРОВ

Различают две основные категории схем сверхрегенераторов: в одних прерывистые колебания осуществляются с помощью отдельного вспомогательного генератора, а в других такой процесс осуществляется автоматически в самом сверхрегенеративном каскаде. Схемы второй категории получили название схем с автопрерыванием или с самогашением. Зачастую сверхрегенеративный каскад выполняет также функцию сеточного детектора. На рис. 38 приведена схема сверхрегенеративного приемника с отдельным генератором вспомогательной частоты. Левый каскад на лампе $Л_1$ является сверхрегенеративным сеточным детектором, а каскад на лампе $Л_2$ генератором вспомогательной частоты. Напряжение обратной связи в первом каскаде снимается автотрансформаторно с нижней

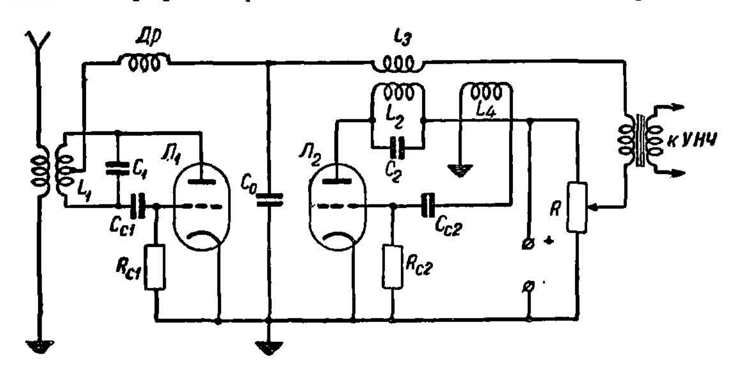


Рис. 38. Схема сверхрегенератора с самостоятельным генератором вспомогательной частоты.

части катушки L_1 и подается ко входу лампы между ее сеткой и катодом. Для этой цели катод лампы соединен с катушкой через конденсатор C_0 и дроссель *Др*.

Правый каскад ничем не отличается от обычного гетеродина и выполнен по схеме с взаимоиндуктивной обратной связью между катушками L_2 и L_4.

Напряжение вспомогательной частоты с автогенератора снимается с помощью катушки L_3 и подается на сетку $Л_1$ сверхрегенератора. Сопротивление R позволяет регулировать усиление сверхрегенератора путем изменения напряжения на аноде $Л_1$.

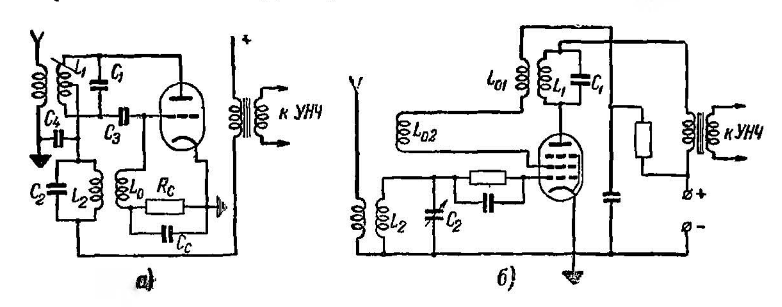


Рис. 39. Схемы сверхрегенераторов с двойной генерацией в одной лампе.

Схема, в которых одна и та же лампа одновременно используется как сверхрегенератор и генератор вспомогательной частоты, приведена на рис. 39,*а*; в ней колебательный контур сверхрегенератора включен между анодом и сеткой, а напряжение обратной связи снимается автотрансформаторно с нижней части катушки L_1 и подается в цепь сетка—катод через конденсаторы C_3, C_4.

Генератор вспомогательной частоты осуществлен по схеме с индуктивной обратной связью с контуром L_2C_2 в цепи анода. Катушка L_0 является катушкой обратной связи. Цепь R_cC_c осуществляет автоматическое смещение на сетке лампы, с помощью которого обеспечивается режим сеточного детектирования. Другой вариант подобной схемы показан на рис. 39,*б*. Здесь в качестве лампы уже используется пентод, образующий как бы две лампы. Первой лампой служит система катод—анод, управляющей сеткой между которыми является вторая (экранирующая) сетка лампы. Вместе с верхним колебательным контуром L_1C_1 и катушкой обратной связи L_{01} лампа обра-

зует генератор вспомогательной частоты. Роль лампы сверхрегенеративного сеточного детектора выполняет система катод—две первые сетки, из которых экранирующая является анодом, а первая управляющей сеткой. Колебательный контур составлен элементами L_2C_2, а катушкой обратной связи служит L_{o2}. В результате действия всей

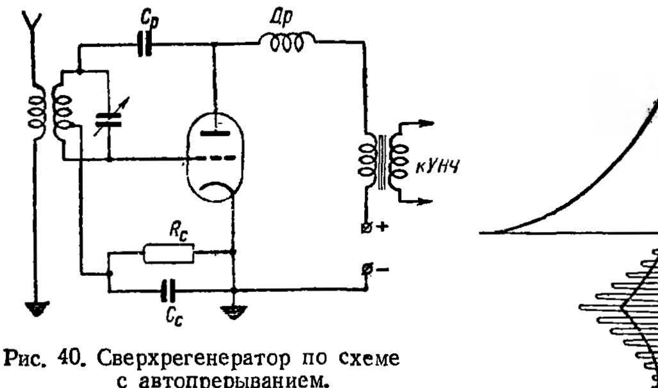


Рис. 40. Сверхрегенератор по схеме с автопрерыванием.

системы в анодной цепи пентода возникают вспышки высокочастотных колебаний.

Остановимся на рассмотрении работы сверхрегенератора с автопрерыванием. На рис. 40 приведен один из вариантов такой схемы. Сверхрегенеративный каскад выполнен с автотрансформаторной обратной связью с применением параллельного питания.

Рис. 41. Колебательный процесс в сверхрегенераторе с автопрерыванием.

Режим прерывистой генерации в таком каскаде достигается путем значительного увеличения сопротивления R_c в цепи автоматического смещения против значений, используемых в обычных автогенераторах. Колебательный процесс в сверхрегенераторе с самогашением изображен на графике (рис. 41). Под воздействием сигнала из антенны в контуре возникают колебания, в цепи сетки появляется сеточный ток i_c, который заряжает конденсатор C_c. По мере увеличения амплитуды колебаний сеточный ток возрастает и напряжение на конденсаторе увеличивается, рабочая точка при этом сдвигается влево, в область с мень-

шей крутизной характеристики анодного тока. Большая величина сопротивления $R_с$ препятствует разряду конденсатора $C_с$. Смещение рабочей точки влево будет продолжаться до тех пор, пока крутизна характеристики будет достаточной для поддержания колебательного процесса. В какой-то момент времени это условие нарушится, колебания сорвутся и конденсатор начнет разряжаться через сопротивление $R_с$, при этом колебательный процесс будет затухать, а рабочая точка возвратится в прежнее поло-

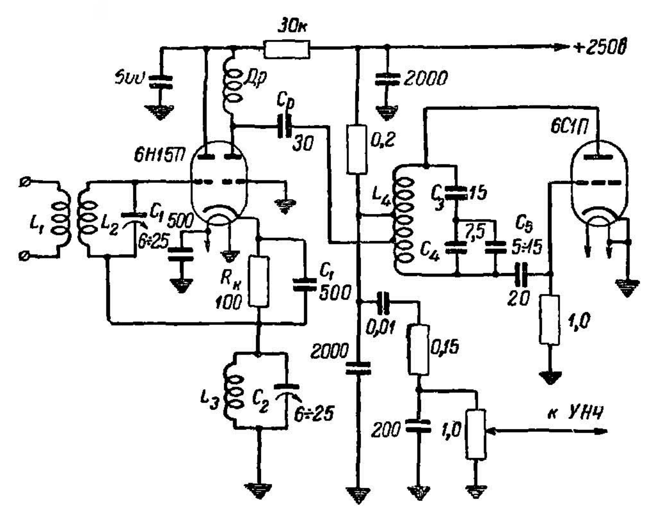


Рис. 42. Схема сверхрегенеративного приемника.

жение. Под воздействием внешнего сигнала этот процесс периодически повторяется. Амплитуда вспышек и, следовательно, среднее значение анодного тока будет повторять закон подводимого сигнала из антенны. Периодичность возникновения вспышек в таких схемах зависит от выбора величин элементов $R_сC_с$.

Практический вариант схемы сверхрегенеративного приемника для диапазона 80—90 *Мгц* приведен на рис. 42.

Для устранения излучения в антенну, а также уменьшения влияния параметров антенны на настройку сверхрегенератора в приемнике использованы два каскада усиления высокой частоты. Учитывая, что при большой чувствительности приемника собственные шумы входного каскада оказывают наибольшее влияние, УВЧ выполнен

по специальной схеме с низким уровнем шума на двух триодах лампы 6Н15П. Левый триод лампы использован в схеме с катодной нагрузкой в виде контура C_2L_3. Второй каскад на правом триоде выполнен по схеме с заземленной сеткой с параллельным питанием. Анодной нагрузкой служит контур сверхрегенеративного каскада, образованный элементами L_4, C_3, C_4, C_5. Дроссель *Др* и разделительный конденсатор $C_р$ обеспечивают параллельное питание этого каскада, а цепь $R_кC_к$ создает автоматическое смещение на сетках обоих триодов. В качестве сверхрегенеративного каскада использована схема с автопрерыванием на лампе типа 6С1П. Усилитель высокой частоты имеет постоянную настройку на среднюю частоту 80 *Мгц* и обеспечивает прием сигналов в заданном диапазоне. Это объясняется тем, что резонансные кривые контура в диапазоне УКВ характеризуются весьма широкой полосой, допускающей прием сигналов в широком интервале частот. Настройка сверхрегенератора обеспечивается переменным конденсатором C_5 емкостью 5—15 *пф*.

Катушки индуктивности имеют следующие данные: L_1 содержит 2,75 витка с длиной намотки 8 *мм*; L_2, L_3 имеют по 5 витков при длине намотки 30 *мм*; L_4 имеет 5,5 витков с длиной 25 *мм*. Средний отвод на катушке L_4 сделан от 3-го витка, а нижний отвод от 4, 5-го витка сверху. Катушки мотаются на болванке диаметром 14 *мм* посеребренным проводом 2 *мм*. Высокочастотный дроссель намотан на сопротивлении ВС-0,5 величиной не менее 100 *ком* и содержит 40 витков провода ПЭЛ-0,25. Для усиления низкой частоты может быть использована одно- или двухкаскадная схема в зависимости от назначения приемника.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПАРАЗИТНЫЕ ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ

18. ВИДЫ ПАРАЗИТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Паразитная обратная связь может быть как отрицательной, так и положительной. Во втором случае отдельные части схемы приемника могут самовозбуждаться, т. е. в них самопроизвольно возникают собственные колебания. Если такой системой является усилитель, то в результате

возникновения автоколебаний он превращается в автогенератор. Следует отметить, что самовозбуждение усилителей возникает вне зависимости от того, имеется или отсутствует на его входе переменное напряжение.

В супергетеродинном приемнике усиление сигналов последовательно осуществляется на высокой, промежуточной и звуковой частотах. Наличие усилителей, работающих на различных частотах, означает, что самовозбуждение в супергетеродине может возникать на любой из этих частот. Возникновение собственных колебаний в усилителе сопровождается появлением на выходе приемника свистов различной высоты, гудения, щелчков или треска, напоминающего шум моторной лодки.

При самовозбуждении усилителя промежуточной частоты появляются колебания, близкие по частоте к промежуточной. Колебания этих частот в громкоговорителе не прослушиваются, а самовозбуждение обычно обнаруживается только при воздействии на приемник входного сигнала. Принимаемый сигнал в этом случае преобразуется в колебания промежуточной частоты, и в результате на входе детектора возникают колебания двух частот: преобразованное колебание, равное промежуточной частоте, и паразитное колебание, частота которого обычно ниже промежуточной.

Детектор приемника выполняет роль преобразователя частоты; на его выходе получаются колебания с частотой, равной разности частот подводимых сигналов. Колебания эти обычно находятся в диапазоне звуковых частот и создают шум, характерный для самовозбуждения.

Основными видами паразитной обратной связи в усилителях являются:

1. Связь между выходом и входом усилительного каскада через междуэлектродную емкость лампы.

2. Связь через общие источники питания.

3. Электроакустическая обратная связь.

4. Положительная обратная связь, возникающая через цепь отрицательной обратной связи.

5. Обратная связь, вызывающая самовозбуждение на сверхвысокой частоте.

Приведенный перечень не исчерпывает всех возможных обратных связей. Связь между выходом и входом отдельных каскадов или усилителя в целом может возникнуть через любые взаимодействия емкостного или индуктивного характера. Такого рода воздействия возникают между

проводами усилителя, между катушками, трансформаторами и другими деталями. Предупреждение подобного вида нежелательных обратных связей достигается путем рационального расположения элементов схемы, правильного монтажа, экранированием катушек, трансформаторов и отдельных проводов.

19. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ЧЕРЕЗ МЕЖДУЭЛЕКТРОДНУЮ ЕМКОСТЬ

Этот вид обратной связи проявляется в основном в усилителях высокой и промежуточной частоты.

В радиовещательных приемниках каскады усиления осуществляются главным образом по схеме с общим катодом, и паразитная обратная связь между выходом и входом каскада возникает через емкость анод—управляющая сетка. Рассмотрим существо физических процессов, вызывающих самовозбуждение усилителя.

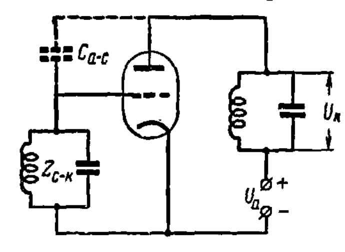


Рис. 43. К вопросу о самовозбуждении резонансных усилителей.

На рис. 43 представлена упрощенная схема однокаскадного резонансного усилителя, на входе которого включен контур, относящийся к цепи предшествующего каскада. Полагаем, что сигнал извне на сетку лампы не подается. Колебательный процесс в таком каскаде может возникнуть самопроизвольно под воздействием случайного электрического толчка. Таким толчком может служить нарастание постоянного тока в анодной цепи после включения источника питания.

Кратковременное изменение тока в катушке анодного контура оказывается вполне достаточным для возникновения э. д. с. самоиндукции и появления колебательного процесса (переменного напряжения $U_к$) в контуре. Как видно из схемы, напряжение это приложено к делителю, одним плечом которого является емкость анод—сетка $C_{а\text{-}с}$, а вторым — сопротивление $Z_{с\text{-}к}$ сеточного контура. Напряжение, снимаемое с сеточного контура, подведено к сетке и поэтому управляет анодным током лампы. Изменяющийся анодный ток лампы проходит по колебательному контуру, восполняет в нем потери энергии, бла-

годаря чему колебания в контуре становятся незатухающими, а система в целом превращается в автогенератор. Автоколебания в усилителе возникнут только в том случае, если переменная составляющая анодного тока, восполняющая энергию в контуре, будет иметь достаточную величину. В свою очередь величина этой переменной составляющей определяется переменным напряжением на сетке, а последнее зависит от соотношения сопротивлений плеч делителя. Для того чтобы подводимое к сетке напряжение обратной связи было недостаточным для возникновения самовозбуждения, паразитная емкость анод—сетка должна иметь весьма малую величину. Усилитель, в котором достигнуты условия, исключающие самовозбуждение, называется устойчивым. Вопрос об устойчивости в теории усилителей высокой частоты является одним из первостепенных. В теоретических работах В. И. Сифорова показано, что усилитель должен работать в режиме, далеком от самовозбуждения, и введено понятие о коэффициенте устойчивого усиления каскада:

$$K_{уст} = 0,42\sqrt{\frac{S}{\omega C_{а\text{-}с}}}.$$

Приведенная формула позволяет судить о предельно возможном усилении каскада; из формулы также следует, что основной показатель усилителя, его коэффициент усиления, в значительной мере зависит от типа применяемых ламп; наибольшее устойчивое усиление каскада достигается при малой емкости $C_{а\text{-}с}$ и большой крутизне ламп S, т. е. характеризуется отношением $\frac{S}{C_{а\text{-}с}}$. Это отношение достигает наибольших значений только в пентодах высокой частоты, которые являются основным типом ламп для усиления колебаний высокой частоты. На устойчивую работу усилителя в сильной степени влияет частота усиливаемых колебаний; труднее удовлетворить условие устойчивости на более высокой частоте, так как с ростом частоты емкостное сопротивление участка сетка — анод $\frac{1}{\omega C_{а\text{-}с}}$ падает и обратная связь возрастает.

В таблице приведены значения $\frac{S}{C_{а\text{-}с}}$ и коэффициенты устойчивого усиления для наиболее употребительных пентодов.

Тип лампы	S, *ма/в*	$\frac{S}{C_{\text{а-с}}}$, *а/ф*	$K_{\text{уст}}=0{,}42\sqrt{\frac{S}{\omega C_{\text{а-с}}}}$		
			150 *кгц*	1,5 *Мгц*	15 *Мгц*
6К1П	1,85	$1{,}85\cdot10^{11}$	185	49	15
6К3	2,0	$6{,}7\cdot10^{11}$	353	111	35
6К4	4,7	$9\ 4\cdot10^{11}$	420	136	42
6К4П	4,4	$12{,}5\cdot10^{11}$	486	157	48
1К1П	0,75	$0{,}75\cdot10^{11}$	118	37	12
6К7	1,45	$2{,}9\cdot10^{11}$	132	73	23

Изложенное позволяет сделать некоторые выводы. Усиление каскада не должно быть больше своего допустимого значения $K_{\text{уст}}$. Для этого необходимо, чтобы резонансное сопротивление анодной нагрузки не превышало определенной величины, соответствующей данному типу лампы. Это означает, что применение в усилителе промежуточной частоты произвольного типа фильтра может вызвать самовозбуждение. В практической работе при использовании готовых фильтров необходимо знать тип лампы, для которой он предназначен. Такой фильтр может быть использован и с другой лампы, у которой значение $\frac{S}{C_{\text{а-с}}}$ больше, чем для лампы, предназначенной к работе с этим фильтром.

20. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ ЧЕРЕЗ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Обратная связь через общие источники питания, особенно в многокаскадных схемах, может явиться причиной самовозбуждения усилителя. Этот вид обратной связи проявляется как в усилителях низкой, так и высокой частоты. Наиболее часто на работу усилителя оказывает влияние связь через общий источник анодного питания. На сверхвысоких частотах следует учитывать и связь через общее питание накальных цепей ламп. Элементом связи в этих случаях является внутреннее сопротивление источника или же гасящее сопротивление в общей цепи питания. Для выяснения процессов, порождающих самовозбуждение, обратимся к схеме трехкаскадного усилителя низкой частоты, показанной на рис. 44.

Будем считать за начальный электрический толчок случайное изменение напряжения на входе первого каскада. Полагаем, что полярность этого мгновенного напряжения соответствует плюсу на сетке. Учитывая, что электронная лампа поворачивает фазу напряжения на 180°, и принимая лампу за генератор переменного тока, можно показать на схеме знаки мгновенных напряжений на каждой лампе и направления переменных составляющих анодных токов i_1, i_2, i_3. Через сопротивление источника R протекают токи всех трех ламп, причем токи i_1 и i_3 имеют одно направ-

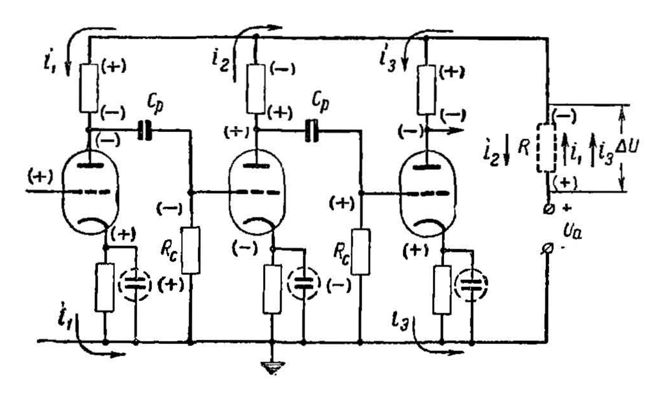


Рис. 44. Паразитная обратная связь в многокаскадном усилителе через общий источник питания.

ление, а ток i_2 — противоположное. Принимая во внимание усиление каскадов, следует считать, что сумма мгновенных токов i_1+i_3 больше i_2. При этом мгновенное напряжение ΔU на сопротивлении R будет иметь знак, соответствующий направлению суммарного тока. Напряжение ΔU на сопротивлении R имеет полярность, согласную с напряжением на сопротивлении анодной нагрузки первой лампы, и поэтому будет с ним суммироваться. Следовательно, напряжение на сетке второй лампы возрастет, в усилителе возникнет положительная обратная связь, которая может вызвать самовозбуждение. Процесс возбуждения усилителя можно представить в следующем виде. Вследствие наличия положительной обратной связи напряжение на входе второй лампы возрастает, увеличение напряжения на входе порождает увеличение напряжения обратной связи, которое снова повышает напряжение на

входе. Таким образом амплитуда колебаний будет непрерывно нарастать, и усилитель превращается в генератор звуковых колебаний.

В двухкаскадном усилителе условия для появления положительной обратной связи через источник питания отсутствуют. Самовозбуждение через источники питания устраняют включением в анодные цепи развязывающих фильтров Г-образного типа из сопротивлений $R_ф$ и конденсаторов $C_ф$ (рис. 45). Последняя схема содержит смеситель и два каскада усиления промежуточной частоты.

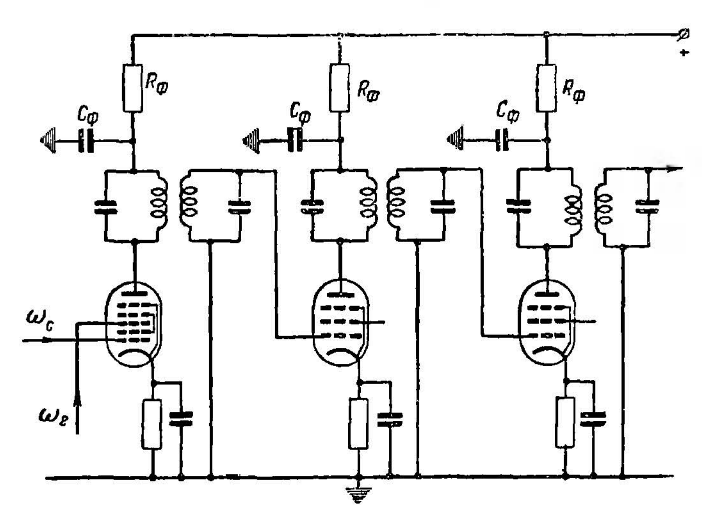


Рис. 45. Усилитель промежуточной частоты с развязывающими фильтрами.

Развязывающие фильтры включены не только в анодные цепи УПЧ, но и в анодную цепь смесителя.

Г-образный фильтр можно рассматривать как своеобразный делитель напряжения (рис. 46). Здесь на вход фильтра включены два источника, один из которых имитирует постоянное напряжение питания, а другой — переменное напряжение, возникающее на внутреннем сопротивлении источника. Напряжения эти делятся пропорционально сопротивлениям фильтра R и X_C. Напряжение с конденсатора подается на анод лампы. Переменное напряжение $\Delta U'$ на выходе фильтра может уменьшиться по сравнению с ΔU до 1 000 раз, в зависимости от соотношения R и X_C.

Постоянное напряжение E' обычно составляет величину порядка (0,8—0,9) E.

Практически для низкочастотных усилителей конденсатор фильтра имеет емкость в пределах 5—10 *мкф*, а сопротивление имеет величину порядка десятков килоом. В цепях промежуточной частоты сопротивление берут в пределах 1—5 *ком*, а емкость 0,05—0,1 *мкф*.

Самовозбуждение усилителя низкой частоты, проявляющееся в виде шума, напоминающего рокот моторной лодки, обусловливается следующими причинами. При работе усилителя, особенно в режиме большой громкости, происходят значительные изменения анодного тока выходной лампы, что в свою очередь вызывает колебания анодного напряжения. Вследствие этого напряжение питания пульсирует на низкой частоте звукового диапазона. Пульсация анодного напряжения подводится к сеткам усилительных ламп через цепи, образованные межкаскадными разделительными конденсаторами $C_р$ и сопротивлениями утечек сеток $R_с$ (рис. 44). В результате этого и возникает обратная связь между входом и выходом усилителя. Предупреждение подобного вида генерации может быть достигнуто снижением усиления на самых низких частотах. Напомним, что усиление в области нижних частот звукового диапазона в основном зависит от емкости разделительного конденсатора. При больших значениях емкости не только повышается усиление на нижних частотах, но и возрастает обратная связь на них. Поэтому снижение емкости разделительного конденсатора является эффективным средством устранения моторного шума. Наряду с этим целесообразно использовать развязывающие фильтры в анодных цепях усилительных ламп. Следует отметить, что самовозбуждение в усилителях при использовании двухтактных схем возникает сравнительно редко. В этом случае в общей цепи питания переменные составляющие токов каждого плеча протекают в противоположных направлениях и разностный ток существует только за счет асимметрии плеч и по своей величине является незначительным.

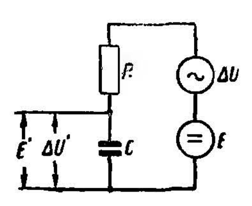


Рис. 46. К объяснению принципа действия Г-образного фильтра.

Одной из возможных причин самовозбуждения приемников может быть также наличие гасящего сопротивления в общей цепи анодного питания. Поэтому снижение анод-

ного напряжения следует производить самостоятельно в анодных цепях каждой лампы. При этом роль гасящих сопротивлений могут выполнять сопротивления развязывающих фильтров.

21. ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Обратная связь в приемниках может осуществляться не только через электрические цепи, но и через акустическую среду. Таковой являются воздух, шасси, корпус приемника и т. п. Замыкание электрической цепи через акустическую среду, т. е. образование замкнутой петли обратной связи, возможно только тогда, когда в составе этой петли имеется элемент, преобразующий звуковые колебания в электрические. Принцип действия подобных преобразователей напоминает работу микрофона, а поэтому процесс, происходящий в них, получил название «микрофонного эффекта».

Микрофонный эффект возникает под воздействием звуковых колебаний, которые вызывают вибрацию элементов схемы приемника. Микрофонному эффекту в основном подвержены лампы усилителя низкой частоты, лампа гетеродина и блок конденсаторов переменной емкости. Звуковые колебания, создаваемые громкоговорителем, передаются через акустическую среду и воздействуют, предположим, на первую лампу усилителя низкой частоты. Вибрация электродов лампы вызывает изменение анодного тока с частотой этих вибраций, и лампа, как говорят, начинает «микрофонить».

При определенном соотношении фаз и сильной обратной связи эти дополнительные колебания анодного тока, накладываясь на основные колебания, вызывают в системе генерацию, которая проявляется как завывание громкоговорителя.

Если вибрации подвергается лампа гетеродина или конденсатор переменной емкости контура гетеродина, то в результате микрофонного эффекта напряжение промежуточной частоты будет изменяться с частотой вибрации; фаза этих дополнительных колебаний может совпасть с огибающей напряжения промежуточной частоты, что также приведет к генерации.

К мерам, предупреждающим появление микрофонного эффекта, относится амортизация блока конденсаторов переменной емкости и шасси приемника. Для амортизации можно использовать шайбы из губчатой резины. Проявле-

ние микрофонного эффекта при использовании современных электронных ламп мало вероятно, поскольку в них осуществлено жесткое крепление электродов и они мало чувствительны к механическим вибрациям.

22. САМОВОЗБУЖДЕНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Как уже отмечалось во второй главе, в многокаскадных усилителях на крайних частотах диапазона обратная связь может принимать положительный знак, вызывая тем самым подъем усиления на этих частотах и даже самовозбуждение.

Усилитель с обратной связью представляет собой замкнутую петлю, в которой осуществляется процесс последовательной передачи напряжения со входа усилителя на его выход и затем по цепи обратной связи снова на его вход. В эту петлю включены лампы и целый ряд реактивных элементов, влияющих на фазу передаваемого напряжения. Лампа, как известно, поворачивает напряжение на 180°, а такие реактивные элементы, как переходные конденсаторы, паразитные емкости, индуктивности рассеяния трансформаторов и др., вызывают различные фазовые сдвиги. Цепи же, состоящие из активных элементов, не создают фазовых сдвигов.

Вследствие этого получение необходимого для отрицательной обратной связи фазового угла в 180° между входным и обратным напряжением в многокаскадных схемах в широком диапазоне частот представляет определенные трудности. Если фазовые сдвиги обусловленные упомянутыми реактивными элементами, создадут на каких-либо частотах в сумме дополнительный сдвиг фаз на угол 180°, то обратная связь из отрицательной превращается в положительную и усилитель на этих частотах может самовозбуждаться.

Значительные по величине дополнительные фазовые сдвиги наблюдаются главным образом за границами полосы пропускания и, следовательно, частота, на которой возникает самовозбуждение, чаще всего находится вне пределов рабочего диапазона. Самовозбуждение, обусловленное такой обратной связью, не проявляется в виде характерного шума и поэтому обнаруживается с некоторыми трудностями. В этом случае лампа выходного каскада часть мощности расходует на создание паразитных коле-

баний и отдача полезной мощности нагрузке заметно уменьшается.

Работа усилителя с отрицательной обратной связью тем устойчивее, чем меньшее число каскадов охвачено обратной связью. Это следует учитывать при конструировании многокаскадных усилителей, претендующих на качественное воспроизведение сигналов. Уменьшение нелинейных искажений, проявляющихся главным образом в оконечном каскаде, может быть достигнуто при охвате обратной связью только этого каскада. Для улучшения частотных характеристик, а также для регулировки тембра, обратной связью могут быть охвачены два, три и более каскадов усиления. Однако при этом не следует допускать глубокой обратной связи. В усилителях с числом каскадов от четырех и более рекомендуется применять отдельные цепи обратной связи, создавая не одну, а, скажем, две петли связи. При этом каждая петля должна охватывать не более двух каскадов.

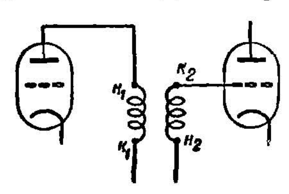


Рис. 47. Правильное включение обмоток междулампового трансформатора.

Заметим, что если в схеме имеются трансформаторы, самовозбуждение усилителя может возникнуть и в том случае, когда отрицательной обратной связью охвачены один или два каскада. Для предупреждения такой обратной связи рекомендуется включение междуламповых трансформаторов производить, руководствуясь рис. 47.

Самозвобуждение усилителей на сверхвысокой частоте, т. е. в диапазонах метровых и дециметровых волн, встречается преимущественно в выходных каскадах сравнительно большой мощности, главным образом при использовании двухтактных схем. Оно возникает чаще всего при симметричном расположении монтажных проводов в цепях сеток и проводов, соединяющих аноды ламп с выходным трансформатором. Такой монтаж приводит к образованию колебательных контуров с распределенными постоянными, которые имеют собственные частоты в указанном диапазоне.

При самовозбуждении на СВЧ выходная мощность усилителя снижается и появляются значительные нелинейные искажения (хрип).

Обнаружение генерации на СВЧ часто затруднительно.

23. ПРАКТИЧЕСКИЕ МЕРЫ ПО УСТРАНЕНИЮ САМОВОЗБУЖДЕНИЯ

При налаживании радиоприемника радиолюбитель даже высокой квалификации, встречаясь с явлением самовозбуждения, обычно испытывает значительные трудности на путях к его устранению. Наибольшее затруднение вызывает решение вопроса, в какой части приемника возникает самовозбуждение и какова его причина.

Самовозбуждение в усилителе низкой частоты обычно возникает на какой-либо высшей или низшей частоте звукового диапазона. Самовозбуждение на высшей частоте прослушивается в форме писка, свиста или шипения и может также наблюдаться по накаливанию сетки или анода оконечной лампы.

Если после отключения высокочастотной части приемника шум сохраняется, значит, возбуждение происходит в усилителе низкой частоты. Для отключения высокочастотной части достаточно вынуть лампу усилителя промежуточной частоты, предшествующую детектору.

Далее следует установить, происходит ли самовозбуждение усилителя низкой частоты через цепь отрицательной обратной связи или вследствие наличия взаимодействий емкостного или индуктивного характера. Влияние отрицательной обратной связи на самовозбуждение проверяется путем ее отключения; исчезновение самовозбуждения при этом дает основание к проверке цепи обратной связи. При проверке в первую очередь рекомендуется установить правильность выполнения цепи обратной связи.

При наличии в усилителе низкой частоты одного или нескольких трансформаторов следует попробовать произвести переключение концов одной из его обмоток.

Самовозбуждение при правильном выполнении цепи обратной связи может возникать, если она охватывает большое число каскадов и на верхней границе спектра обратная связь из отрицательной превращается в положительную. В этом случае в качестве простейшего способа устранения самовозбуждения можно рекомендовать включение между любой из точек цепи обратной связи, в которой достигается желаемый результат, и корпусом усилителя конденсатора емкостью порядка 100—200 *пф*. Если самовозбуждение устранить не удается, прибегают к включению в цепь обратной связи корректирующих фильтров. Однако этот способ требует наличия приборов, позволяющих снимать частотную характеристику усилителя и высо-

кой квалификации настройщика. Одна из схем такой корректирующей цепи — фильтр-пробка — изображена на рис. 48. Он состоит из параллельного контура и сопротивления R и включается последовательно в разрыв цепи обратной связи; при этом точка a присоединяется со стороны выхода цепи обратной связи, а точка $б$ — со стороны ее входа.

Контур, настроенный на частоту, близкую к частоте генерации усилителя, характеризуется значительным по величине резонансным сопротивлением $R_{o.e} = \frac{L}{Cr}$ и вместе с сопротивлением R образует делитель напряжения. Если сопротивление $R_{o.e} > R$, то на частоте генерации глубина обратной связи уменьшается и, следовательно, самовозбуждение должно прекратиться. На средних частотах, также имеет место уменьшение глубины обратной связи, зависящее от соотношения сопротивлений R и r.

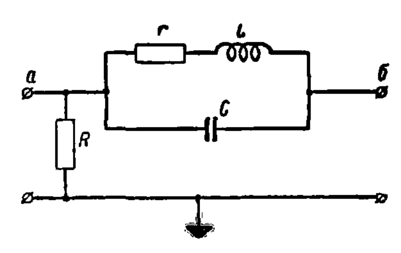


Рис. 48. Корректирующая цепь по схеме фильтр-пробки.

Частота самовозбуждения усилителя может быть найдена по области наибольшего подъема его частотной характеристики. Элементы контура следует подбирать так, чтобы собственная резонансная частота контура была несколько ниже частоты генерации. Сопротивление R должно в 10—20 раз превышать сопротивление r и быть меньше $R_{o.e}$. В усилителях, имеющих несколько цепей отрицательной обратной связи, устранение самовозбуждения следует производить путем последовательного отключения каждой цепи в отдельности, а затем действовать в соответствии с вышеизложенным.

Если при отключении цепи обратной связи самовозбуждение не пропадает, причину его следует искать в монтаже. Необходимо разнести близко идущие провода входных и выходных цепей; не допускать, чтобы эти провода располагались параллельно друг другу. Можно также экранировать провода сеточных цепей лампы, заземляя при этом экран.

Самовозбуждение усилителя низкой частоты возникает

часто и на нижней границе звукового спектра. Характерным признаком такой генерации служит шум, подобный рокоту моторной лодки, или шум в виде мягких щелчков. Подобное самовозбуждение наблюдается, как уже указывалось, в основном в многокаскадных усилителях за счет обратной связи через общий источник анодного питания. Устранение генерации достигается включением развязывающих фильтров. Если они уже имеются, целесообразно увеличить значения емкостей и сопротивлений фильтра.

Уменьшение емкости разделительных конденсаторов в переходных цепях усилителя может также способствовать устранению моторного шума. Следует напомнить еще

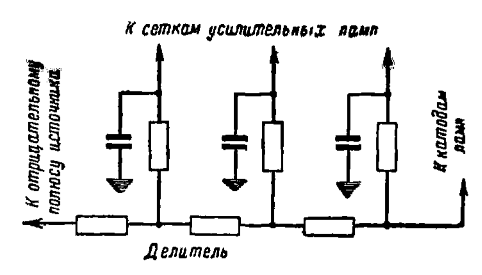


Рис. 49. Развязывающие фильтры в цепях сеточного смещения.

о канале обратной связи через общий источник сеточного смещения. Такой канал имеется только в приемниках, у которых напряжение смещения снимается с общего делителя, включенного в минусовой цепи анодного питания.

Применение развязывающих фильтров в таких цепях (рис. 49) является единственной мерой для устранения паразитной генерации. Емкости берутся здесь в пределах 0,1—1 *мкф*, а сопротивления — 0,1—0,2 *Мом*.

Самовозбуждение в цепях высокой и промежуточной частоты проявляется в виде различных шумов или в форме прерывистой генерации. Наиболее часто шумы проявляются при включенной антенне или при подаче на вход напряжения от генератора стандартных сигналов. Это обычно является признаком самовозбуждения как усилителя промежуточной частоты, так и усилителя высокой частоты. Если подавать на вход преобразовательного каскада напряжение промежуточной частоты от ГСС, то специфичный шум в громкоговорителе позволяет судить о наличии паразитной генерации именно в усилителе промежу-

точной частоты. Лампу усилителя высокой частоты при наличии таковой следует вынуть.

При отсутствии ГСС в качестве индикатора паразитных колебаний может быть использован микроамперметр. На рис. 50 показан способ включения микроамперметра в распространенную схему детекторного каскада.

Если при отключении высокочастотного каскада миллиамперметр дает показание, значит самовозбуждается усилитель промежуточной частоты. Самовозбуждение усилителя высокой частоты также обнаруживается с помощью микроамперметра, но при включенном высокочастотном каскаде. Причинами самовозбуждения усилителей высокой

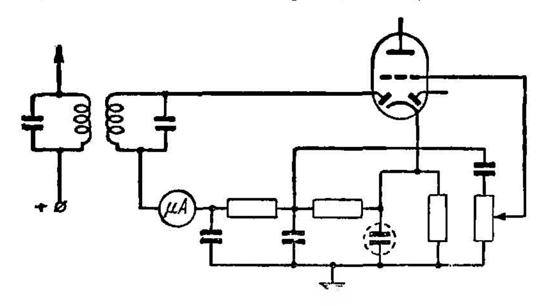


Рис. 50. Включение микроамперметра в цепь детектора.

и промежуточной частоты могут быть: обратная связь через емкость $C_{а\text{-}с}$, обратная связь через источник анодного питания, особенно при числе каскадов более двух, и более часто через связи, обусловленные неудачным монтажом и недостаточной экранировкой отдельных элементов цепи. Устранение самовозбуждения следует начинать с проверки выполнения монтажа. При этом все рекомендации, изложенные выше для низкочастотных цепей, сохраняются полностью для цепей высокой и промежуточной частоты.

Самовозбуждение усилителя высокой частоты, который обычно содержит один каскад, возможно через емкость $C_{а\text{-}с}$. При использовании схемы усилителя с трансформаторным или автотрансформаторным включением контура следует уменьшить связь контура с анодной цепью путем раздвижения катушки контура и катушки связи и при автотрансформаторной связи путем переключения анодного вывода к меньшей части контурной катушки.

В схеме с полным включением контура при наличии возможности целесообразно ввести автотрансформаторную связь; в качестве крайней нежелательной меры можно испробовать шунтирование контура сопротивлением в несколько сот килоом. При этом следует учесть, что шунтирование уменьшает эквивалентное резонансное сопротивление контура и, следовательно, усиление каскада; кроме того, снижается добротность контура и тем самым ухудшается избирательность по зеркальному каналу. Обратная связь через общий источник питания более свойственна усилителю промежуточной частоты. Применение развязывающих фильтров при такой обратной связи является наиболее радикальным средством.

Обратная связь через общий источник может возникнуть и при небольшом числе каскадов — вследствие проникновения через детектор колебаний промежуточной частоты в первый каскад усилителя низкой частоты. Этот каскад при этом становится апериодическим каскадом усиления промежуточной частоты, вследствие чего создаются благоприятные фазовые соотношения для возникновения положительной обратной связи. Устранение такой связи в ряде случаев достигается включением между вводом сетки и сопротивлением утечки первого каскада усилителя сопротивления порядка 1—20 *ком*. Вместе с входной емкостью лампы это сопротивление образует делитель напряжения, благодаря чему напряжение промежуточной частоты на входе усилителя низкой частоты резко уменьшается.

К разновидности самовозбуждения приемника на промежуточной частоте относится случай, когда оно наблюдается только при настройке приемника на границах длинноволнового и средневолнового диапазонов.

Резонансное сопротивление входных контуров на этих частотах (415 и 520 *кгц*) становится близким к резонансному сопротивлению полосовых фильтров промежуточной частоты. При этом возникает положительная обратная связь между анодной цепью смесителя и входным контуром смесителя за счет междуэлектродной емкости $C_{а\text{-}с}$ или емкости монтажа между этими цепями.

Подобный вид самовозбуждения легко обнаруживается по исчезновению генерации при изменении настройки приемника и может быть устранен теми же способами, которые были рекомендованы для усилителя высокой частоты.

Одним из часто встречающихся видов самовозбуждения приемника является прерывистая генерация. Ее возникновение, помимо уже рассмотренных связей электрического характера, может быть также электроакустической связью. Прерывистая генерация в усилителях высокой или промежуточной частоты обнаруживается по оптическому индикатору настройки или при отсутствии такового с помощью микроамперметра, включенного в цепь детектора. И в том и в другом случае происходит либо мигание затемненного сектора на экране оптического индикатора, либо качание стрелки микроамперметра в такт с пропаданием и исчезновением звука. Методы устранения прерывистой генерации такого вида ничем не отличаются от методов, рассмотренных ранее.

Если прерывистая генерация или завывание обусловлены электроакустической обратной связью, то они обнаруживаются в основном при значительной громкости воспроизведения звука. При снижении ее генерация пропадает. Электроакустическая обратная связь может быть ликвидирована путем амортизирования шасси приемника и блока конденсаторов переменной емкости, закрепления монтажных проводов, идущих к гетеродину, а также исключения касания стенок ящика осями ручек органов управления.

Микрофонный эффект, создаваемый лампами, устраняется путем надевания на них свинцовых колец.

Остановимся кратко на мерах устранения самовозбуждения на сверхвысокой частоте. Наличие самовозбуждения на СВЧ может быть обнаружено с помощью неоновой лампочки, которая светится, если ее поместить рядом с выходной лампой или вблизи ее вводов.

Генерация может быть обнаружена также путем блокирования сетки лампы конденсатором. В этом случае показания миллиамперметра, включенного в анодную цепь, резко уменьшаются, что является характерным признаком срыва паразитных колебаний.

В некоторых случаях паразитные колебания можно наблюдать с помощью осциллографа. На вход усилителя подается синусоидальное колебание низкой частоты; при наличии генерации на с. в. ч. на экране осциллографа наблюдается синусоида, окаймленная своеобразной «бахромой».

Наиболее эффективным средством устранения генерации на с. в. ч. является включение антипаразитных сопро-

тивлений непосредственно у вводов сеток и анодов ламп. Сопротивление в цепи анода должно иметь величину порядка 30—50 *ом*. В цепи сеток ламп, работающих в режимах классов A и B_1 (без сеточных токов), включают сопротивления до 10 *ком*, а при использовании режима класса B_2 или AB_2 — порядка 50 *ом*.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В СХЕМАХ НА ТРАНЗИСТОРАХ

24. ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

В схемах на транзисторах, как и на радиолампах, обратная связь может быть искусственной и паразитной. Паразитная обратная связь в транзисторах называется также внутренней обратной связью. Положительная внутренняя обратная связь может явиться причиной самовозбуждения.

Искусственная обратная связь в схемах на транзисторах применяется в основном для тех же целей, что и в схемах на радиолампах. Использование положительной обратной связи повышает чувствительность и избирательность приемника. С помощью отрицательной обратной связи удается уменьшить все виды искажений, повысить устойчивость приемника и стабильность его работы.

Искусственная отрицательная обратная связь, осуществляемая с помощью внешних элементов, может быть параллельной и последовательной. При этом она может охватывать каскад как по постоянной, так и по переменной составляющей. На рис. 51 приведены типичные схемы каскадов усиления низкой частоты на сопротивлениях по схеме с общим эмиттером с параллельной обратной связью. На схеме рис. 51,*а* каскад одновременно охвачен обратной связью по постоянной и переменной составляющей; и та и другая обратная связь осуществляется с помощью сопротивления R_β, включенного между коллектором и базой.

Отрицательный знак обратной связи в каскаде достигается потому. что в схеме с заземленным эмиттером сдвиг по фазе между входным и выходным напряжением

составляет 180°. По своему принципу действия такая обратная связь подобна параллельной обратной связи: она уменьшает искажения всех видов, входное и выходное сопротивления каскада и, как всякая отрицательная обратная связь, понижает коэффициент усиления каскада.

Наличие отрицательной обратной связи по постоянному току позволяет стабилизировать режим усилителя, т. е. ослабить влияние непостоянства параметров и характеристик транзистора и питающих напряжений на работу усилителя. Для схемы с заземленным эмиттером режим по постоянному току задается напряжением на коллекторе и током смещения базы, выполняющего роль смещения на сетке в ламповых схемах.

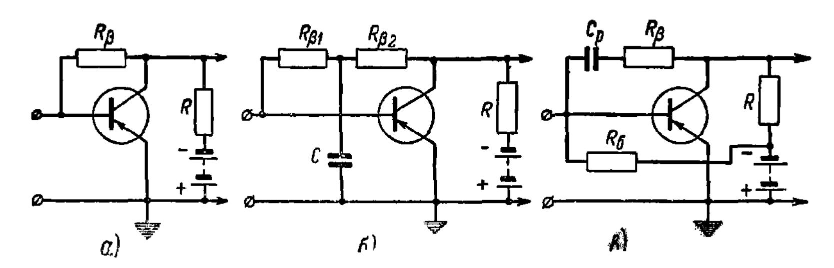


Рис. 51. Схемы каскадов на транзисторах с параллельной обратной связью.

Режим по постоянному току может быть стабилизирован путем сохранения неизменной величины постоянной составляющей тока коллектора; для этого необходимо, чтобы изменения постоянной составляющей тока коллектора или напряжения на коллекторе вызывали противоположное по знаку изменения тока смещения базы. Полной аналогией в этом отношении является пример сохранения постоянства анодного тока в лампе в том случае, когда приращение анодного напряжения компенсируется противоположным по знаку и соответствующим по величине приращением сеточного напряжения.

Подобная связь между выходной и входной цепью лампы или транзистора является не чем иным, как отрицательной обратной связью по постоянному току. Предположим, что из-за повышения температуры или по другой причине ток коллектора возрос. Тогда напряжение на сопротивлении нагрузки R увеличится и на базу транзистора через сопротивление R_β будет подано дополнительное

положительное напряжение, которое вызовет уменьшение тока смещения базы; ток коллектора при этом уменьшится, сохранив почти свое исходное значение. Эффективность стабилизации режима в такой схеме зависит от величины сопротивления R. При малых его значениях напряжение на коллекторе изменяется незначительно и поэтому слабо влияет на ток смещения.

Сопротивление обратной связи R_β определяется из условия получения заданного значения тока смещения базы $I_{б0}$ по формуле

$$R_\beta = \frac{U_{к0} - U_{б0}}{I_{б0}},$$

где $U_{к0}$ — постоянная составляющая напряжения на коллекторе;

$U_{б0}$ — постоянная составляющая напряжения на базе.

Величиной $U_{б0}$ за ее малостью по сравнению с $U_{к0}$ практически можно пренебречь.

В тех случаях, когда одновременное действие обратной связи по переменной и постоянной составляющим не желательно, прибегают к устранению связи по одной из составляющих. В схеме рис. 51,*б* исключена обратная связь по переменной составляющей. Для этого сопротивление R_β выполнено из двух частей—$R_{\beta 1}$ и $R_{\beta 2}$, общая точка которых заземлена через конденсатор большой емкости C. Действие его и устраняет обратную связь по переменной составляющей. В схеме рис. 51,*в*, наоборот, исключается обратная связь по постоянной составляющей. С этой целью в цепь обратной связи включен разделительный конденсатор $C_р$. Ток смещения базы подается через сопротивление $R_б$. При таком способе подачи смещения стабильность режима по постоянному току не обеспечивается.

Параллельная обратная связь используется и в многокаскадных усилителях. Например в трехкаскадном усилителе отрицательная обратная связь может быть осуществлена с помощью последовательной цепи $R_\beta C_р$, включенной между коллектором последнего каскада и базой первого каскада.

Схема с последовательной отрицательной обратной связью (рис. 52) по принципу действия и по своим свойствам аналогична схемам отрицательной обратной связи

по току в ламповых усилителях. Здесь последовательная отрицательная обратная связь осуществляется по переменной и по постоянной составляющим через сопротивление $R_э$ в цепи эмиттера. Действие обратной связи по переменному току увеличивает входное сопротивление каскада, благодаря чему облегчаются условия межкаскадного согласования, а ее действие по постоянной составляющей стабилизирует режим каскада по постоянному току. При увеличении тока коллектора возрастает падение напряжения на сопротивлении $R_э$, и поэтому положительный потенциал на эмиттере становится меньше, при этом ток смещения базы уменьшается, осуществляя тем самым стабилизацию режима. В схеме рис. 52 обратная связь по переменной составляющей может быть устранена путем шунтирования сопротивления $R_э$ конденсатором большой емкости.

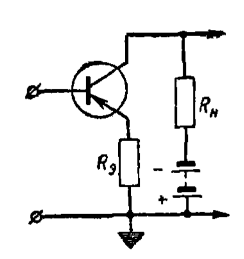


Рис. 52. Каскад усиления на транзисторе с последовательной обратной связью.

25. ВНУТРЕННЯЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ И СПОСОБЫ ЕЕ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ

Транзистор отличается от электронной лампы тем, что в нем связь между входом и выходом имеет двухсторонний характер. При такой связи изменение режима выходной цепи отражается на режиме входной цепи и, наоборот, любые изменения тока или напряжения на входе вызывают реакцию на выходе. Внутренняя обратная связь в транзисторах обусловлена наличием междуэлектродных сопротивлений.

Эта внутренняя двухсторонняя обратная связь создает на высоких частотах взаимозависимость настроек контуров входной и выходной цепей, которая особо сказывается в многокаскадных схемах. Более подробное рассмотрение внутренней обратной связи в полупроводниковых триодах облегчается с помощью эквивалентных схем, которые, так же как и для электронных ламп, представляются либо эквивалентными схемами сопротивлений, либо эквивалентными схемами проводимостей.

На рис. 53,*а* приведена эквивалентная Т-образная схема сопротивлений плоскостного транзистора. На ней сопротивление эммиттерного перехода обозначено через $r_э$,

сопротивление коллекторного перехода через $r_к$, а сопротивление базы показано двумя составляющими $r_б$ и $r_{бб'}$. База транзистора может быть представлена состоящей как бы из двух слоев. В одном слое, принимающем непосредственное участие в работе транзистора, происходит диффузионное движение носителей заряда от эмиттера к коллектору; сопротивление этого слоя называется действующим и обозначается через $r_б$. Другой слой осуществляет электрическое соединение действующей области $r_б$ с выводом базы *б*. Сопротивление этой части базы называется распределенным $r_{б-б'}$, величина его зависит от материала и конструкции триодов и составляет обычно 50—500 *ом*. На эквивалентной схеме рис. 53,*а* показаны также емкости между соответствующими электродами и фиктивный генератор тока $\alpha I_э$, имитирующий усилительные свойства транзистора по току.

В схеме с общей базой имеются две цепи обратной связи. Через сопротивление базы возникает отрицательная обратная связь, относящаяся к категории последовательной обратной связи по току. Второй цепью обратной связи служит емкость между коллектором и эмиттером; действие ее подобно обратной связи в ламповом усилителе с заземленной сеткой через емкость анод—катод. Эта обратная связь является положительной, и действие ее нарушает устойчивость усилительного каскада.

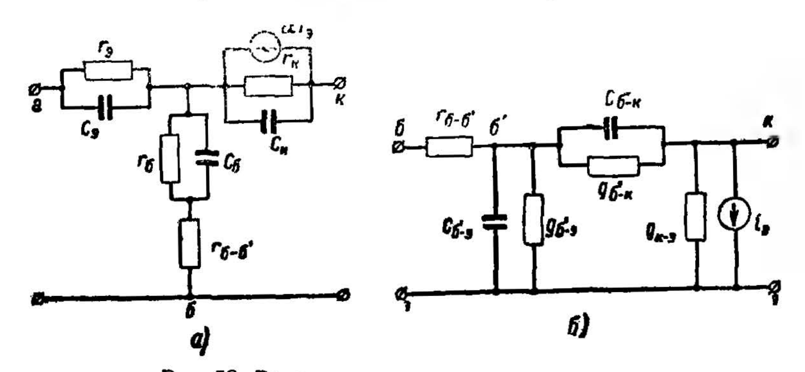


Рис. 53. Эквивалентные схемы транзистора.
а—Т-образная схема сопротивлений; б—П-образная схема проводимостей.

При рассмотрении схем с общим эмиттером, получивших наибольшее распространение, удобнее пользоваться

эквивалентной схемой проводимостей П-образного вида. Схема такого вида приведена на рис. 53,*б*. На ней показаны активные проводимости и емкости между соответствующими точками схемы. На обеих эквивалентных схемах точка *б* — вывод базы, а *б'* — точка между действующим и распределенным сопротивлениями базы. Здесь, так же как в эквивалентной схеме сопротивлений, усилительные свойства представлены фиктивным генератором тока $i_г$, но уже подключенным не последовательно, а параллельно выходной цепи. Как видно из эквивалентной схемы, обратная связь в усилителе с общим эмиттером осуществляется через активную проводимость $g'_{б\text{-}к}$ и емкость $C'_{б\text{-}к}$. По своему характеру эта связь подобна параллельной обратной связи по напряжению.

Внутренние обратные связи, являясь одним из основных недостатков транзистора, могут быть в значительной мере нейтрализованы. В основу метода нейтрализации положен принцип сбалансированного моста переменного тока. Во внешнюю цепь транзистора включается та или иная компенсирующая цепь, которая вместе с принятой эквивалентной схемой триода образует сбалансированный мост. Схема моста строится с таким расчетом, чтобы вход и выход каскада оказались включенными в его диагонали. Как известно из теории, при наличии баланса моста изменение тока в одной из диагоналей не отражается на токе в другой диагонали. Это означает, что паразитная взаимосвязь между входом и выходом устраняется как в прямом, так и обратном направлениях. При этом передача полезного сигнала в прямом направлении сохраняется вследствие того, что в эквивалентной схеме имеется фиктивный генератор, управляемый входным сигналом.

Внутренняя обратная связь в транзисторах является частотно-зависимой, поэтому добиться полной ее нейтрализации в весьма широком диапазоне частот представляет значительные трудности. В практических схемах удовлетворительная нейтрализация обеспечивается в относительно широкой полосе частот, порядка нескольких сот килогерц.

На рис. 54,*а* приведена схема нейтрализации для транзистора с заземленной базой. Элементами компенсирующей цепи в схеме являются сопротивления R_1, R_2 и емкость *C*. Индексами *1—1'* и *2—2'* обозначены входные и выходные вводы нейтрализованного транзистора. Нейтра-

лизация осуществлена на основе Т-образной эквивалентной схемы сопротивлений.

На рис. 54,*б* и *в* изображены эквивалентные схемы самого транзистора и компенсирующей цепи, причем эквивалентная схема транзистора (между точками *э*, *б*, *к*) несколько упрощена по сравнению со схемой, показанной на рис. 53,*а*. Вторая эквивалентная схема (рис. 54,*в*) изображена для наглядности в виде моста. Условием баланса такого моста, т. е. условием нейтрализации, является равенство произведений полных сопротивлений его противоположных плеч. Отметим, что во всех схемах нейтрализации мостового типа, в том числе и в рассмотренной схеме,

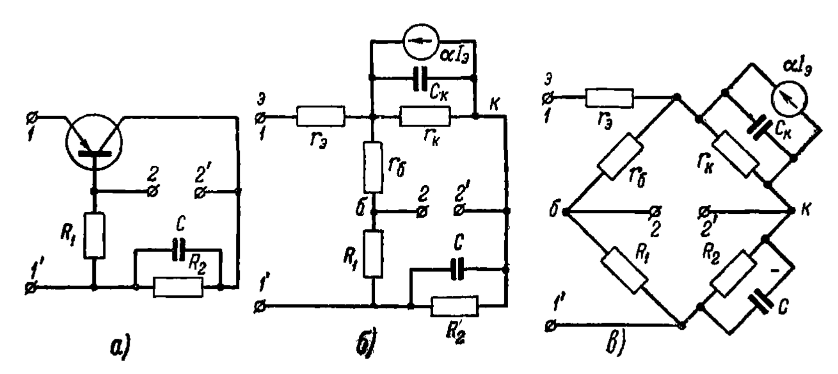


Рис. 54. Нейтрализация внутренней обратной связи в схеме с заземленной базой.

отсутствует общая точка (земля) для входных и выходных зажимов. Поэтому при создании многокаскадных схем необходимо использовать переходные трансформаторы.

При выборе схемы нейтрализации необходимо, добиваясь наилучшего результата, стремиться также к упрощению компенсирующей цепи. Этим требованиям удовлетворяет схема нейтрализации для транзистора с общим эмиттером на основе П-образной эквивалентной схемы проводимостей. На рис. 55,*а* изображена принципиальная схема одного каскада с компенсирующей цепью, а на рис. 55,*б* его эквивалентная схема.

Обратная связь в такой эквивалентной схеме осуществляется через емкость $C_{б',к}$ и активную проводимость $g_{б',к}$, вследствие чего колебательные контуры L_1C_1 и L_2C_2 различных каскадов становятся взаимосвязанными и оказывают влияние один на другой. Влияние второго контура

на первый осуществляется через ток обратной связи, протекающий через катушку связи $L_{св1}$ первого контура. Для устранения такого влияния использована компенсирующая цепочка, представленная на принципиальной схеме элементами $C_к R_к$, а на эквивалентной схеме — элементами $C_к g_к$. Задачей компенсирующей цепи является создание в той

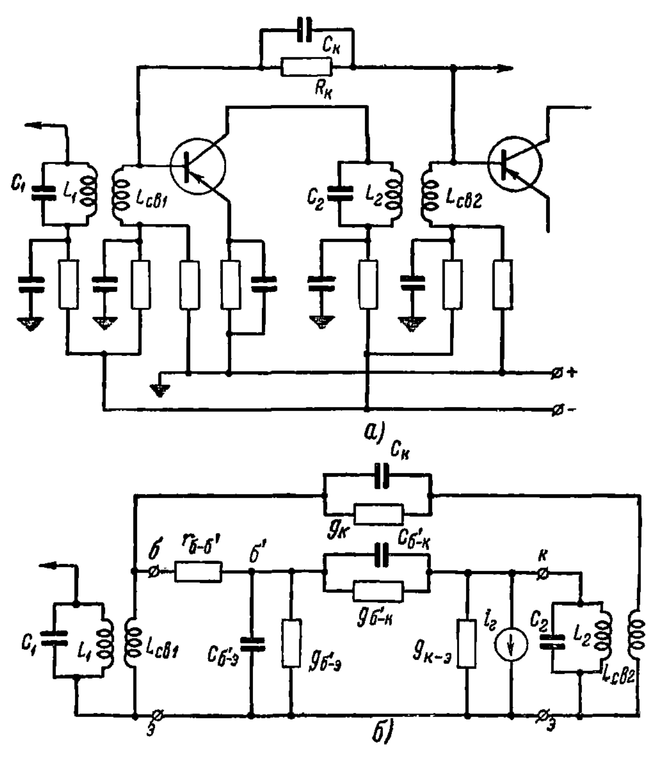


Рис. 55. Нейтрализация обратной связи в усилителе промежуточной частоты по схеме с общим эмиттером.

же катушке связи первого контура такого компенсирующего тока, величина которого должна быть равна, а направление противоположно току обратной связи. Для получения противофазного компенсирующего тока цепь, $C_к g_к$ соединена с катушкой связи $L_{св2}$ второго контура напряжение на которой сдвинуто относительно напряжения на катушки контура L_2 на 180°. Необходимая величина

компенсирующего тока достигается при условии, когда сопротивление и емкость компенсирующей цепи $C_к g_к$ будут во столько раз больше соответствующих элементов цепи обратной связи, во сколько раз понижается напряжение в катушке $L_{св2}$ по сравнению с катушкой L_2. В многокаскадных схемах такие компенсирующие цепи включаются между эмиттерами соседних каскадов.

26. ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ

Положительная обратная связь как средство повышения чувствительности и избирательности приемников может быть также использована в схемах на транзисторах. Принцип действия регенеративного каскада на транзисторах ничем не отличается от действия такового на электронных лампах. Обратную связь можно вводить как в детекторный, так и высокочастотный каскад приемника. На рис. 56 приведена схема апериодического усилителя высокой частоты с положительной обратной связью, взятая из одного иностранного журнала и лично проверенная автором.

В усилителе использован точечный транзистор типа С1Г, включенный по схеме с общей базой. В цепь эмиттера включен настраиваемый колебательный контур.

Нагрузкой коллекторной цепи служит дроссель L_0, который одновременно является катушкой обратной связи.

В прилагаемой схеме найдено оригинальное решение вопроса о согласовании малого входного сопротивления каскада со значительным сопротивлением входного контура. С этой целью во входной контур последовательно с его реактивными элементами включено сопротивление R, с которого снимается напряжение на эмиттер транзистора. Такое включение сопротивления в контур допустимо только при наличии в каскаде положительной обратной связи. Действие ее, как известно, равносильно внесению в контур дополнительной энергии, в результате чего происходит компенсация не только потерь в собственном сопротивлении контура, но и потерь в дополнительном сопротивлении R. При глубокой обратной связи ток в контуре приобретает большое значение и создает на сопротивлении R значительное напряжение, подводимое ко входу каскада. Для перекрытия диапазона средних волн в настраиваемом контуре такого приемника используется малогабаритный переменный конденсатор с емкостью 10—100 *пф*. В каче-

стве индуктивностей контура и обратной связи использованы катушки с универсальной намоткой. Контурная катушка имеет индуктивность порядка 600 *мкгн*. Величина индуктивности катушки обратной связи несколько меньше. Она подбирается экспериментально.

Сопротивление $R_б$ и конденсатор $C_б$ в цепи базы обеспечивают подачу смещения на эмиттер транзистора. Для детектирования в приемнике использована схема удвоения на двух полупроводниковых диодах $Д_1$ и $Д_2$. Усиление по низкой частоте может быть обеспечено любой схемой. Приемник питается от батареи с напряжением 4,5 *в*. Прием

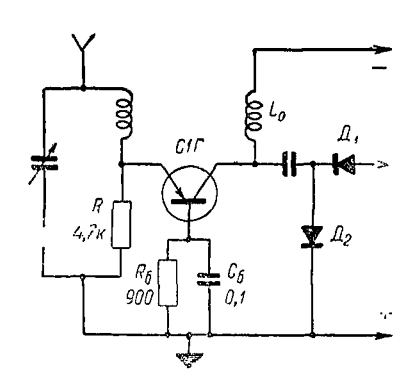


Рис. 56. Практическая схема усилителя высокой частоты с положительной обратной связью.

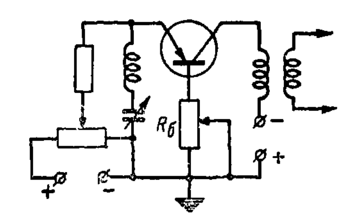


Рис. 57. Схема усилителя с положительной обратной связью, осуществляемой через сопротивление в цепи базы транзистора.

сигналов производится на телескопическую антенну высотой 1 *м*. Такой приемник, как показали его испытания, обладает достаточно острой настройкой и в зависимости от схемы усилителя низкой частоты может обеспечить высокую чувствительность. Так, при использовании трехкаскадного усилителя низкой частоты приемник обеспечивал в районе Москвы в радиусе 70 *км* уверенный прием станций трех программ.

В заключение остановимся на разновидности положительной обратной связи, свойственной только транзисторам точечного типа. Обратная связь в этом случае может быть осуществлена с помощью сопротивления $R_б$, включенного в цепи базы (рис. 57), и называется резистивной обратной связью.

Через сопротивление $R_б$ ток эмиттера $I_э$ и ток кол-

лектора $I_к$ протекают в противоположных направлениях и создают на нем напряжение:

$$U_б = R_б (I_э - I_к).$$

Ток коллектора может быть выражен через коэффициент усиления по току $I_к = \alpha I_э$, тогда

$$U_б = R_б I_э (1 - \alpha).$$

Если учесть, что для точечных триодов $\alpha > 1$, то положительное приращение тока эмиттера $\Delta I_э$ вызывает отрицательное приращение напряжения $\Delta U_б$. При такой зависимости между напряжением $U_б$ и током $I_э$ сопротивление участка эмиттер — земля приобретает отрицательный характер, что равносильно образованию на этом участке положительной обратной связи. На схеме рис. 57 контур, включенный в цепи эмиттера, шунтируется отрицательным сопротивлением, благодаря чему эквивалентное активное сопротивление контура уменьшается, а добротность контура возрастает. Схема такого вида может выполнять как роль автогенератора, так и роль регенератора. Регулировка обратной связи в ней осуществляется изменением величины сопротивления $R_б$.

Обратная связь через сопротивление $R_б$ в цепи базы в транзисторах точечного типа часто носит паразитный характер и может вызывать самовозбуждение усилителей. Наилучшая устойчивость таких транзисторов достигается в схемах с общей базой. Это объясняется тем, что возникновение самовозбуждения в такой схеме возможно лишь при сравнительно большой величине сопротивления $R_б$. В схемах с общим эмиттером или коллектором величина $R_б$, обеспечивающая устойчивую работу, оказывается незначительной, и поэтому такие схемы более склонны к самовозбуждению.

При рассмотрении этого вопроса следует учитывать, что роль сопротивления $R_б$ в схемах с общим эмиттером или коллектором выполняет собственное сопротивление источника сигнала, включаемое последовательно с базой.

Чтобы дать представление о порядке величины сопротивления базы $R_б$, при которой входное сопротивление

каскада с общей базой приобретает отрицательное значение, воспользуемся следующей приближенной формулой:

$$R_{вх} \approx r_э + (R_б + r_б)(1 - \alpha),$$

где $r_э$ — сопротивление эмиттера;

$r_б$ — сопротивление базы.

Для точечного триода типа С1Г:

$$r_э = 550 \text{ ом}, \ r_б = 200 \text{ ом}, \ \alpha = 1{,}5.$$

Легко убедиться, что при значениях сопротивления $R_б > 900$ *ом* $R_{вх}$ становится отрицательным. Так, например, при $R_б = 1\,200$ *ом*.

$$R_{вх} \approx 550 + (1\,200 + 200)(1 - 1{,}5) = -150 \text{ ом}.$$

В схемах же с общим эмиттером, как показывают подробные исследования каскада, при сопротивлениях нагрузки в цепи коллектора в несколько тысяч ом входное сопротивление всегда имеет отрицательный характер порядка десятков и даже сотен ом, и лишь при увеличении сопротивления нагрузки до десятков и сотен килоом оно приобретает положительное значение.

Поэтому для устойчивого усиления высокочастотных колебаний каскады с транзисторами точечного типа выполняются по схеме с общей базой.

Таблица основных данных выходных пентодов и лучевых тетродов, используемых в оконечных каскадах усилителей низкой частоты

Основные данные	Типы ламп					
	6П3С	6П6С	6П9	6П1П	6П14П	6П18П
Выходная мощность $P_{вых}$, *вт*	5,4	3,6	3	3,8	5	3
Амплитуда напряжения на управляющей сетке U_c, *в*	14	12,5	3	12,5	4	4
Внутреннее сопротивление R_i, *ком*	24	52	130	50	30	23
Крутизна характеристики S, *ма/в*	6	4,1	11	4,5	11,3	11
Коэффициент усиления μ	—	—	—	—	350	250
Коэффициент нелинейных искажений γ, %	10	6	7	7	8	8
Приведенное сопротивление анодной нагрузки R_a, *ком*	2,5	5	10	5	4,8	3
Напряжение на аноде, *в*	250	250	300	250	250	250
Напряжение на экранирующей сетке, *в*	250	250	150	250	250	250

ЛИТЕРАТУРА

Баркан В. Ф., Жданов В. К., Радиоприемные устройства, Оборонгиз, 1956.

Войшвилло Г. К., Усилители низкой частоты, Связьиздат. 1939.

Гольдреер И. Г., Ламповый каскад с обратной связью, Госэнергоиздат, 1954.

Гершзон Е. В. и Николаевский Н. Ф., Полупроводниковые триоды в схемах радиовещательной и телевизионной аппаратуры, Госэнергоиздат, 1957.

Кризе С. Н., Усилители напряжения низкой частоты, Госэнергоиздат, 1953.

Куликовский А. А., Линейные каскады радиоприемников, Госэнергоиздат, 1958.

Лабутин В. К., Новое в технике высококачественного усиления, Госэнергоиздат, 1957.

Методы нейтрализации внутренней обратной связи в полупроводниковых триодах, Госэнергоиздат, 1957.

Ризкин А. А., Основные теории усилительных схем, Изд. «Советское радио», 1958.

Токарев П. Д., Настройка радиоприемников, Лениздат, 1957.

Цыкин Г. С., Отрицательная обратная связь и ее применение, Связьиздат, 1940.

Цена 1 р. 95 к.

Мне всегда нравились старые, сильно потрёпанные книжки. Потрёпанность книги говорит о её высокой востребованности, а старость о вечно ценном содержании. Всё сказанное в большей степени касается именно технической литературы. Только техническая литература содержит в себе ту великую и полезную информацию, которая не подвластна ни политическим веяниям, ни моде, ни настроениям! Только техническая литература требует от своего автора по истине великих усилий и знаний. Порой требуется опыт целой жизни, чтобы написать небольшую и внешне невзрачную книгу.

К сожалению ни что не вечно в этом мире, книги треплются, разваливаются на отдельные листы, которые затем рвутся в клочья и уходят в никуда. Плюс ко всему орды варваров, которым без разницы, что бросить в костёр или чем вытереть свой зад. Именно их мы можем благодарить за сожженные и растоптанные библиотеки.

Если у Вас есть старая книга или журнал, то не дайте им умереть, отсканируйте их и пришлите мне. Совместными усилиями мы можем создать по истине уникальное и ценное собрание старых технических книг и журналов.